

角度多重方式ホログラフィックメモリの
システム性能評価モデル構築と最適化設計

宇都宮大学大学院 工学研究科

システム創成工学専攻

石井 利樹

要旨

角度多重方式ホログラフィックメモリのシステム性能を評価可能なモデルを構築し、容量と転送速度の観点からパラメータを最適化する設計指針を示すことを目的として研究を行った。

まず、システムパラメータを入力として記録密度、転送速度、媒体に要求されるダイナミックレンジ、信号品質を出力するシステム性能評価モデルを構築した。また、振動の影響を評価するためのモデルを構築した。

次に、ノイズを低減する3つの技術開発を行った。1つ目に、ピクセル間で位相差を付加するピクセル間クロストークキャンセル技術を開発した。2つ目に、隣接ページ間で位相差を付加するページ間クロストークキャンセル技術を開発した。3つ目に、振動の影響解析手法を確立し効果的な記録停止処理を開発した。

最後に、記録密度と転送速度の観点からパラメータを最適化し設計指針を示した。ディスクあたりの記録容量は1.07 TBから最終的に3.49 TBまで3.3倍高められる可能性を示した。転送速度に関しては、20.0 MB/sの転送速度を設計上は97.4 MB/sまで高めることができることを示した。

Abstract

The purpose of this research is to construct a model for evaluating system performance of angular multiplexing holographic memory and show a guideline for optimizing parameters from the viewpoint of recording density and transfer rate.

First, we constructed a model for evaluating system performance whose inputs are system parameters and outputs are recording density, transfer rate, required dynamic range for a medium, signal quality. We also constructed a model for evaluating vibration effect.

Next, we developed three techniques to reduce noise. First one is inter-pixel crosstalk cancellation by applying phase between adjacent pixel. Second one is inter-page crosstalk cancellation by applying phase between adjacent page. Third one is an efficient write operation technique based on evaluating method for vibration effect.

Finally, we optimized system parameters in the view of recording density and transfer rate. We showed a possibility to improve capacity per a disk to 3.49 TB, which is 3.3 times larger than original 1.07 TB. We also showed a possibility to enhance transfer rate from 20.0 MB/s to 97.4 MB/s.

目次

| | | |
|-------|-------------------------|----|
| 1 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 角度多重方式ホログラフィックメモリの特徴 | 1 |
| 1.1.1 | 光ディスクの役割 | 1 |
| 1.1.2 | 次世代光ディスクの方式 | 2 |
| 1.1.3 | ホログラフィックメモリの分類 | 3 |
| 1.2 | 本研究の位置付け | 4 |
| 1.3 | 本論文の構成 | 5 |
| 2 | 角度多重方式ホログラフィックメモリのモデル構築 | 6 |
| 2.1 | はじめに | 6 |
| 2.2 | 記録密度のモデル化 | 6 |
| 2.2.1 | ページ容量 | 7 |
| 2.2.2 | 多重数 | 10 |
| 2.2.3 | ブック数 | 11 |
| 2.3 | 転送速度のモデル化 | 11 |
| 2.4 | 媒体ダイナミックレンジのモデル化 | 12 |
| 2.5 | SNR のモデル化 | 14 |
| 2.5.1 | シミュレータ概要 | 14 |
| 2.5.2 | クロストークのモデル化 | 15 |
| 2.6 | 振動のモデル化 | 22 |
| 2.6.1 | 参照光の波数ベクトル | 23 |
| 2.6.2 | 参照光の振動のモデル化 | 25 |
| 2.6.3 | ディスクのシフト方向の振動のモデル化 | 26 |
| 2.7 | 第2章の結論 | 28 |
| 3 | ノイズ低減技術 | 29 |
| 3.1 | ピクセル間クロストークキャンセル | 29 |
| 3.1.1 | はじめに | 29 |
| 3.1.2 | クロストーク解析 | 29 |
| 3.1.3 | クロストークキャンセル方法 | 31 |
| 3.1.4 | 考察 | 33 |
| 3.2 | ページ間クロストーク低減 | 35 |
| 3.2.1 | はじめに | 35 |
| 3.2.2 | クロストーク解析 | 36 |
| 3.2.3 | クロストークキャンセル方法 | 38 |
| 3.2.4 | 実験結果 | 40 |
| 3.2.5 | 実現に向けた課題と対策 | 41 |
| 3.3 | 振動の影響低減 | 42 |

| | | |
|-------|------------------|----|
| 3.3.1 | はじめに | 42 |
| 3.3.2 | 影響解析手法 | 42 |
| 3.3.3 | 影響解析手法の検証 | 44 |
| 3.3.4 | 記録停止処理の効率化 | 48 |
| 3.3.5 | 考察 | 49 |
| 3.4 | 第3章の結論 | 50 |
| 4 | 最適化設計 | 52 |
| 4.1 | 記録密度最大化 | 52 |
| 4.2 | 転送速度最大化 | 65 |
| 4.3 | 第4章の結論 | 66 |
| 5 | 結論 | 67 |
| | 参考文献 | 69 |
| | 謝辞 | 72 |
| | 研究業績 | 73 |

略語一覧

| | | |
|------|-----------------------------|---------------|
| HDD | Hard Disk Drive | ハードディスクドライブ |
| CD | Compact Disc | コンパクトディスク |
| BD | Blu-ray Disc | ブルーレイディスク |
| NA | Numerical Aperture | 開口数 |
| SIL | Solid Immersion Lens | ソリッドイマージョンレンズ |
| SNR | Signal to Noise Ratio | 信号雑音比 |
| ECLD | External Cavity Laser Diode | 外部共振器型半導体レーザ |
| PBS | Polarizing Beam Splitter | 偏光ビームスプリッタ |
| HWP | Half wave plate | 1/2 波長板 |
| SLM | Spatial Light Modulator | 空間光変調器 |
| RMS | Root Mean Square | 二乗和平方根 |
| LCD | Liquid Crystal Display | 液晶ディスプレイ |

変数一覧

| | |
|-------------------|------------------------|
| p | SLM のピクセルピッチ |
| f | 対物レンズの焦点距離 |
| NA | 対物レンズの開口数 |
| C_p | ページデータ容量 |
| λ | 光源の波長 |
| F | フィルタのナイキストサイズに対する面積比 |
| S_h | ホログラムサイズ |
| N_{page} | 多重数 |
| C_{raw} | 記録密度 |
| c_{page} | 比例係数 |
| θ_{sigin} | 信号光の最内角 |
| θ_{sigout} | 信号光の最外角 |
| θ_{refout} | 参照光の最外角 |
| r_e | レンズ有効半径 |
| r_{in} | ページデータの中心から参照光側の端までの距離 |
| θ_n | 半円に削られる側の頂点の成す角 |
| C_{pm} | モノキュラ光学系のページデータ容量 |
| θ_{refin} | 参照光の最内角 |
| θ_{dead} | 信号光の最内角と成す角 |
| n | 記録層の屈折率 |

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| L | 記録層の厚み |
| θ_S', θ_R' | 信号光と参照光のメディア中におけるメディアの法線からの角度 |
| $\Delta\theta_R'$ | 記録時と再生時の参照光のメディア中の角度差 |
| η | 回折効率 |
| O_{null} | Null 角の倍数で表したページ角度間隔 |
| θ_{null} | Null 角 |
| r_{din} | ディスクの最内周 |
| r_{dout} | 最外角 |
| N_{book} | ブック数 |
| R_{rate} | 符号化率 |
| C_u | ディスク 1 枚当たりのユーザデータ容量 |
| t_{won} | 記録露光時間 |
| t_{woff} | ページ間の移動時間 |
| t_{wbook} | ブック間の移動時間 |
| T_w | 1 枚のディスクを記録するのに要する時間 |
| R_w | 転送速度 |
| I_{sigw}, I_{refw} | 記録時の信号光と参照光のエネルギー密度 |
| m | 干渉縞の変調度 |
| S_{med} | メディア感度 |
| L | 記録層の厚み |
| $M\#_{sig}$ | 信号として記録される M/# |
| $M\#_{holo}$ | ホログラムの部分で消費される M/# |
| $\theta'_{sigout}, \theta'_{refout}$ | メディア中の信号光と参照光の最外角 |
| L_{refB} | ブラッグ方向の参照光の幅 |
| L_{refD} | 縮退方向の参照光の幅 |
| $M\#_{ref}$ | 参照光のみが照射される部分での M/#消費 |
| $M\#_{req}$ | 実際に消費される M/# |
| $M\#_{eff}$ | M/#利用効率 |
| μ_{on}, μ_{off} | On ピクセルと Off ピクセルの分布の平均値 |
| $\sigma_{on}, \sigma_{off}$ | On ピクセルと Off ピクセルの分布の標準偏差 |
| σ | 正規化ノイズ |
| σ_0 | 固定ノイズ |
| σ_i | 固有ノイズ |
| σ_{th} | 許容可能な正規化ノイズ |
| I | 回折光量 |
| E_{s1} | 第 1 のピクセルの振幅 |
| E_{s2} | 第 2 のピクセルの振幅 |
| ϕ_s | ピクセル間の位相差 |

| | |
|-----------------|----------------------|
| θ_{RS}^2 | 信号光と参照光が成す角度 |
| E_{P1} | 再生ページの再生角度における回折光の振幅 |
| E_{P2} | 隣接ページの再生角度における回折光の振幅 |
| ϕ_P | 再生ページと隣接ページの位相差 |
| ϕ_0 | 隣接ページの Null 毎の位相反転 |
| ϕ_C | 記録時にページ間で与える位相差 |
| T_θ | ジョーンズ行列 |
| x | ディスク回転の接線方向 |
| z | デフォーカス方向 |
| ϕ | 縮退方向角度 |
| y | ディスクの半径方向 |
| k | 波数ベクトル |
| R_w | 記録時の参照光 |
| S_{w0} | 記録時の信号光 |
| R_{w0} | 再生時の参照光 |
| P | 回折光の複素振幅 |
| c | 定数 |
| t_r | 記録時の露光時間 |
| N | 層分割の層数 |
| f_{wf} | 角度方向の振動を表す重み係数 |
| P_{CAM} | カメラ上の回折光の複素振幅 |
| g_{wf} | シフト方向の振動を表す重み係数 |
| α_B | 振動振幅の RMS |
| SD | 標準偏差 |

1 序論

1.1 角度多重方式ホログラフィックメモリの特徴

1.1.1 光ディスクの役割

2014年にインドネシアのスラウェシ島で発見された世界最古の洞窟壁画は4万年以上前に描かれたものである。洞窟壁画は芸術や抽象的な概念を考える人間の知能の発端を表しており、これを記録として残すことにより知能が継承され、文明が形成されたと考えられる。紀元前196年にプトレマイオス5世のメンフィスで発した勅令が刻まれたロゼッタ・ストーンは2000年の時を経て1799年に発見され、神聖文字(ヒエログリフ)を理解する鍵となった。このように古来より、情報を記録蓄積して後世に残すことと、その情報を活用することは、人間の知的欲求の根幹を成していると考えられる。

21世紀に入り、コンピュータの発展とともに情報を2進数のデジタル情報として記録するストレージ機器が誕生した。古くはパンチ穴を利用した紙テープに始まり、磁気や光を利用した多種多様なストレージが開発されてきたが、現状利用されているストレージは磁気テープ、HDD、フラッシュストレージ、光ディスクに集約されてきている。表1.1に現在主流のストレージの比較を示す。光ディスクは低ビットコスト、優れた保存性、高可搬性の特徴がある。1990年代から2000年代にかけてCD(Compact Disc)からDVD、BD(Blu-ray Disc)と大容量化と高転送速度化が進展し、主に民生用途で市場を拡大してきた。

表 1.1 ストレージの比較

| Method | Optical disc | Tape | HDD | Flash |
|--------------------|--------------|------|-----|-------|
| Capacity | △ | ○ | ○ | △ |
| Data transfer rate | × | △ | ○ | ◎ |
| Bit cost | ○ | ○ | △ | × |
| Archival life | ◎ | ○ | △ | × |
| Media handling | ◎ | ○ | × | × |

◎: Excellent, ○: Good, △: Average, ×: Poor

しかしながら、近年、パソコンの小型化/薄型化、ネットワーク高速化が進展する中、光ディスクの市場は縮小傾向となっており、また、他ストレージも急激に大容量化と高転送速度化が進んできている。図 1.1 にストレージ容量のメディア毎の比率の推移を示す^[1]。2000年代前半は全世界の5割以上のデジタルデータは光ディスクに保存されていたが、近年はHDD(Hard Disk Drive)が主流となり、また、フラッシュストレージが今後進展する兆しを見せている。

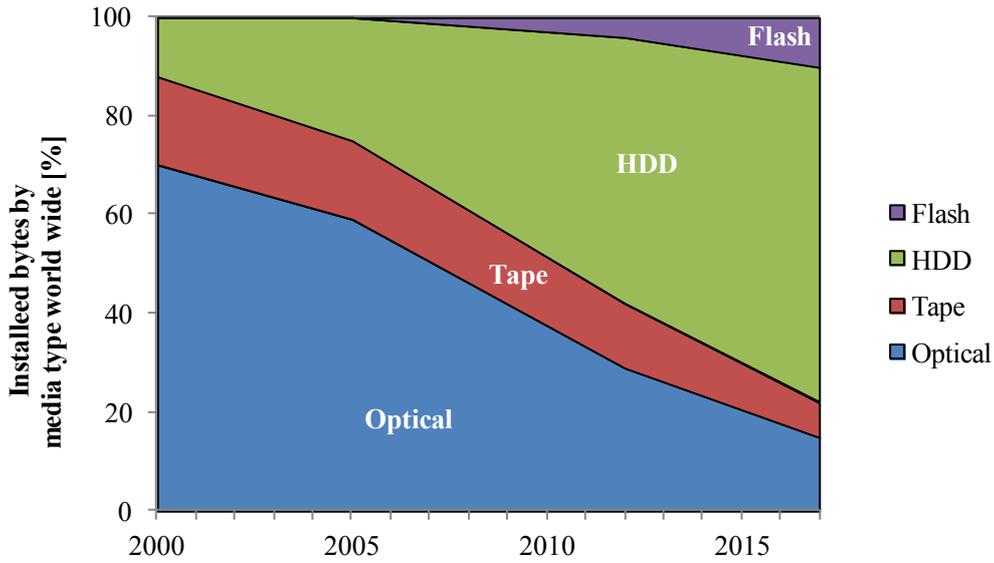


図 1.1 ストレージ容量のメディア毎の比率推移

一方で、世界のデジタルデータ量は加速度的に増加している。世界のデジタルデータ量の推移を図 1.2 に示す^{[2][3]}。2015 年に 8.5ZB であったデータ量は年率 39%で増加し 2020 年には 44ZB になる見通しである。市場では大容量/高転送速度かつ低消費電力なストレージが求められており、光ディスクドライブの並列化による高転送速度化と、ドライブ台数に比して光ディスクを多数枚格納したライブラリシステムによる大容量化を実現するアーカイブストレージとして活用する気運が高まっている。

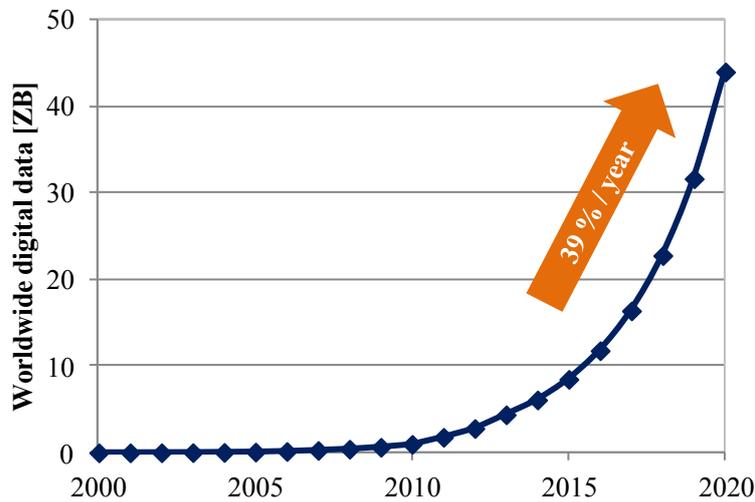


図 1.2 世界のデジタルデータ量

1.1.2 次世代光ディスクの方式

光ディスクはCD, DVD, BDと短波長化と高 NA(Numerical Aperture)化により集光する光スポット径を小さくすることにより大容量化を実現してきた。その後、BDを多層化したBDXLが製品化されており、3層で100GB、4層で

128GB を実現している。また、BDXL の両面对応により容量を 200GB, 256GB に増加している。しかしながら、従来技術の延長ではこれ以上の大容量化は難しく、新たな技術開発が必要である。

次世代光ディスクとして、SIL(Solid Immersion Lens)^[4], 超解像^[5], 2光子吸収^[6], ホログラフィックメモリといった技術が開発されてきた。次世代光ディスクの比較を表 1.2 に示す。ホログラフィックメモリ以外は 1 ビットずつのデータを順次記録再生する技術であるが、ホログラフィックメモリは記録再生の単位としてページデータと呼ばれる 2 次元データを使用することによる高速化が原理的に可能という特徴を有している^{[7][8]}。また、記録媒体に体積的に情報を記録することによる大容量化も可能である。しかしながら、干渉を扱う構成であることから振動に対する耐性が弱く、いまだ実用化には至っていない。

表 1.2 次世代光ディスク方式の比較

| Method | Near field | Super-resolution | Two-photon absorption | Holographic memory |
|--------------------|------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| Capacity | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Data transfer rate | × | × | × | ○ |
| Tolerance | ○ | ○ | ○ | △ |

○: Good, △: Average, ×: Poor

1.1.3 ホログラフィックメモリの分類

ホログラフィは 1948 年に Gabor が電子顕微鏡の解像度を向上させる研究の中で発見した^[9]。当時はレーザが無かったため、鮮明な像が得られなかったが、1960 年にレーザが発明されると、ホログラフィの技術が目されるようになった。1963 年にはホログラフィを用いたメモリ技術が van Heerden により提唱された^[10]。1990 年代には米国の国家プロジェクトの PRISM(Photorefractive Information Storage Materials)と HDSS(Holographic Data Storage System)が始まり、ホログラフィックメモリの技術が広く研究されるようになった。2000 年代にはこれらのプロジェクトの成果を基にルーセントテクノロジー社からスピンアウトした InPhase 社が設立され、角度多重方式をベースとした実用化研究が進んだ^{[11][12]}。日本でもソニーやオプトウェアを中心としたコアキシャル方式の開発が進展した^{[13][14][15]}。コアキシャル方式ではこれまで 415Gbit/in² の記録密度、角度多重方式方式では 2.4Tbit/in² の記録密度の実証が進められてきた。

ホログラフィックメモリでは記録媒体中で信号光と参照光をオーバーラップさせて干渉させることにより干渉縞の明暗を屈折率の変化として記録する。図 1.3 にホログラフィックメモリの分類を模式図で示す。ページデータを用いたホログラフィックメモリの代表的な方式として、参照光の角度を変化させて多重する(a)の角度多重方式と信号光と参照光を同軸上に配置する(b)のコアキシャル方式がある。コアキシャル方式ではフォーリエ面近傍でしか信号光と参照光がオーバーラップしないが、角度多重方式は記録媒体の厚み方向全てで信号光と参照光がオーバーラップ可能であるため、角度多重方式の方が高記録密度の実現に有利であると考えられる。

ホログラフィックメモリは高密度記録と高転送速度という特徴があり、次世代の光ディスクストレージとして有望であるものの、実用化のためには課題も残されている。例えば、SLM, カメラ, レーザ, 記録材料に対する要求仕様が大きいことが従来課題であった。しかしながら、これらのデバイスや記録材料に対しては近年大きな進展が見られた。この他の重要な課題としては周囲温度の影響と振動の影響がある。再生時の周囲温度の変化による記録材

料の膨張収縮による僅かな歪みや振動による記録材料の位置の変動により信号品質が劣化する。再生時の周囲温度の影響に対しては、波長と参照光角度を同時に調整することにより補償することで解決可能である^[20]。

振動対策は現在でも重要な課題の一つである。ホログラフィックメモリは波長オーダーの干渉縞を ms オーダーの比較的長い露光時間で記録媒体に記録する技術であり、記録時の振動は干渉縞のコントラストを低下させ、信号を劣化させる。コアキシャル方式は信号光と参照光が同軸であるため、振動に強い特徴があるが、角度多重方式の実用化のためには、振動対策が重要である。

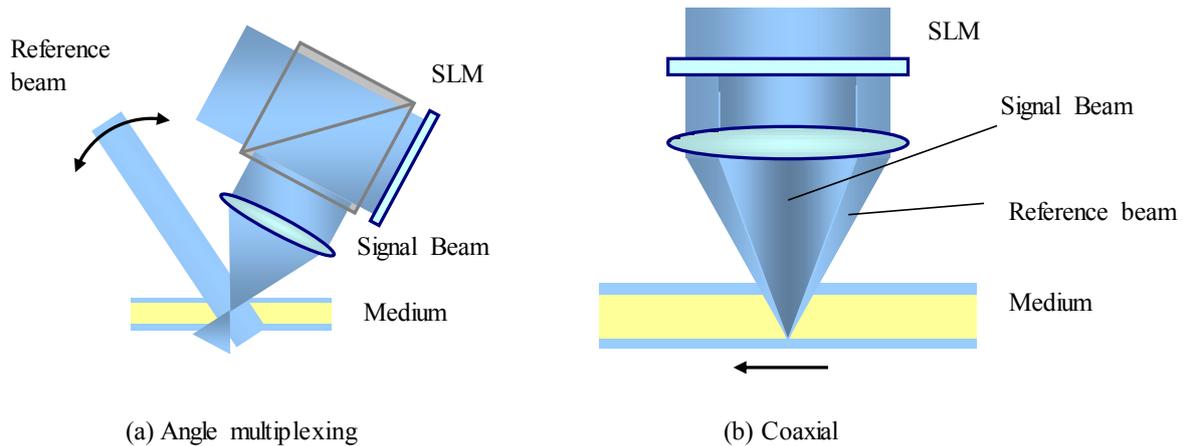


図 1.3 ホログラフィックメモリの分類

ホログラフィックメモリでは、従来、システムの性能を表す記録容量や転送速度がシステムパラメータとどのように依存しているのかを明らかとする研究がなされてきた。Andersonらは記録時のホログラムサイズの縮小と再生時のブック間クロストークの除去を目的としてポリティックフィルタを導入し、従来方式に対して 10 倍記録密度を向上できることを示した^[21]。Orlovらはスペックルによるシフト多重方式で転送速度、記録密度の NA 依存の解析を通じてシステムを最適化し、10 Gbps の転送速度を達成した^[22]。しかしながら、ホログラフィックメモリのシステムパラメータは多岐に渡るため、記録密度、転送速度、記録品質の観点から統合的に解析を行った例はない。このため、システムパラメータの最適化は試作もしくはシミュレーションと評価の繰り返しが必要となり、非常に時間がかかるとともに、決定したパラメータが最適なものであるかの判断がつきにくいという問題があった。

1.2 本研究の位置付け

前節で述べたように、角度多重方式ホログラフィックメモリは、従来の光ディスクの低ビットコスト、優れた保存性、高可搬性の特徴を継承しつつ、大容量と高転送速度を実現可能であるため、アーカイブストレージとしての活用が期待できる。しかしながら、角度多重方式ホログラフィックメモリはシステム構成が複雑であり、設計したパラメータが真に最適であるかは判断が難しい。

以上を鑑み、本研究では角度多重方式ホログラフィックメモリのシステム性能を最適化することを目的として、以下の手順で検討した。

手順 1: システム性能を評価するためのモデル構築

手順 2: 高密度化を実現するためのノイズ低減技術

手順 3: 目的に応じてシステム性能を最適化する設計指針の明確化

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章 序論

第 2 章 角度多重方式ホログラフィックメモリのモデル構築

第 3 章 ノイズ低減技術

第 4 章 最適化設計

第 5 章 結論

第 2 章は手順 1 に対応しており、角度多重方式ホログラフィックメモリのシステムパラメータを相互に関連付けて容量、転送速度、媒体のダイナミックレンジを表す $M/\#$ 、SNR(Signal to Noise Ratio)との関係をモデル化する。また、重要な課題である振動の影響解析のためのモデル化を行う。

第 3 章は手順 2 に対応している。第 3.1 節ではピクセル間クロストークの低減を検討する。ピクセル間クロストークの解析を行い、ピクセル間クロストークキャンセル方法を考案し、シミュレーションにより効果の検証を行う。第 3.2 節ではページ間クロストークの低減を検討する。第 3.1 節と同様にページ間クロストークの解析を行い、ページ間クロストーク低減方法を考案し、シミュレーションによる効果の検証と、実験による妥当性確認を行う。第 3.3 節ではホログラフィックメモリの実用化において重要な課題である振動対策を検討する。ホログラムの記録過程の解析を通じて振動が記録品質に与える影響を明らかにする。また、解析した結果から得られた知見により、ホログラフィックメモリドライブにおける振動の有効な対策方法を提案する。

第 4 章は手順 3 に対応しており、角度多重方式ホログラフィックメモリにおいて、容量と転送速度を最大化するための設計指針について検討し、可能性を明らかにする。

第 5 章では、本研究の成果と今後の課題をまとめ、全体の結論とする。

2 角度多重方式ホログラフィックメモリのモデル構築

2.1 はじめに

本章では角度多重方式ホログラフィックメモリのシステムパラメータを最適化するための基礎となるモデルを構築する。第 2.2 節から第 2.4 節において、記録密度、転送速度、M/#消費をシステムパラメータから解析的に導出する。第 2.5 節では記録品質の指標となる SNR について、シミュレータを構築して算出する。最後に第 2.6 節で振動のモデル化を行う。

2.2 記録密度のモデル化

本節では、まず一般的な角度多重方式におけるシステムパラメータと記録密度の関係を単純化したモデルで論じ、次に高密度化に有効と考えられるモノキュラ光学系におけるシステムパラメータと記録密度の詳細な関係を明らかにする。

図 2.1 に角度多重方式ホログラフィックメモリの基本光学系を示す。波長可変の外部共振器型半導体レーザー (ECLD: External Cavity Laser Diode) から出射したビームは、アナモルフィックプリズムで真円となるように整形され、シャッタを通過後、偏光ビームスプリッタ (PBS: Polarizing Beam Splitter) により信号光と参照光に分けられる。信号光と参照光の比率は 1/2 波長板 (HWP: Half wave plate) で調整可能である。

信号光はビームエキスパンダーと位相マスクを透過後、反射型の空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) により 2 次元ページデータに変調される。位相マスクは信号光の位相をランダムにシフトさせ、メディア中での信号光が集光し過ぎないように適度に拡散させる。これにより、記録媒体のモノマーを効率よく利用できる。変調された信号光は PBS で反射した後、フィルタを通過し、対物レンズにより集光してメディアに入射する。

一方、参照光は、ガルバノミラーで反射した後、スキャナレンズを透過して平行光としてメディアに入射する。参照光はガルバノミラーによりメディアに入射する角度を変え、角度多重記録をすることができる。

以降では、一回の露光で記録される 2 次元ページデータをページと呼び、角度多重をしたページの集合をブックと呼ぶ。一つのブックの記録が終わると、次のブック位置へと移動し、位置付け後にブックの記録を行う動作を繰り返す。

なお、再生時は HWP により参照光のみとし、メディア透過後にガルバノミラー等で反射し、ディスク背面から参照光を照射することで、信号光光路を逆に進む回折光を再生する。この際に、参照光光路上で回折光の偏光が P 偏光となるようにしておくことで PBS2 を透過し、SLM と等価な配置をしたカメラで再生する。

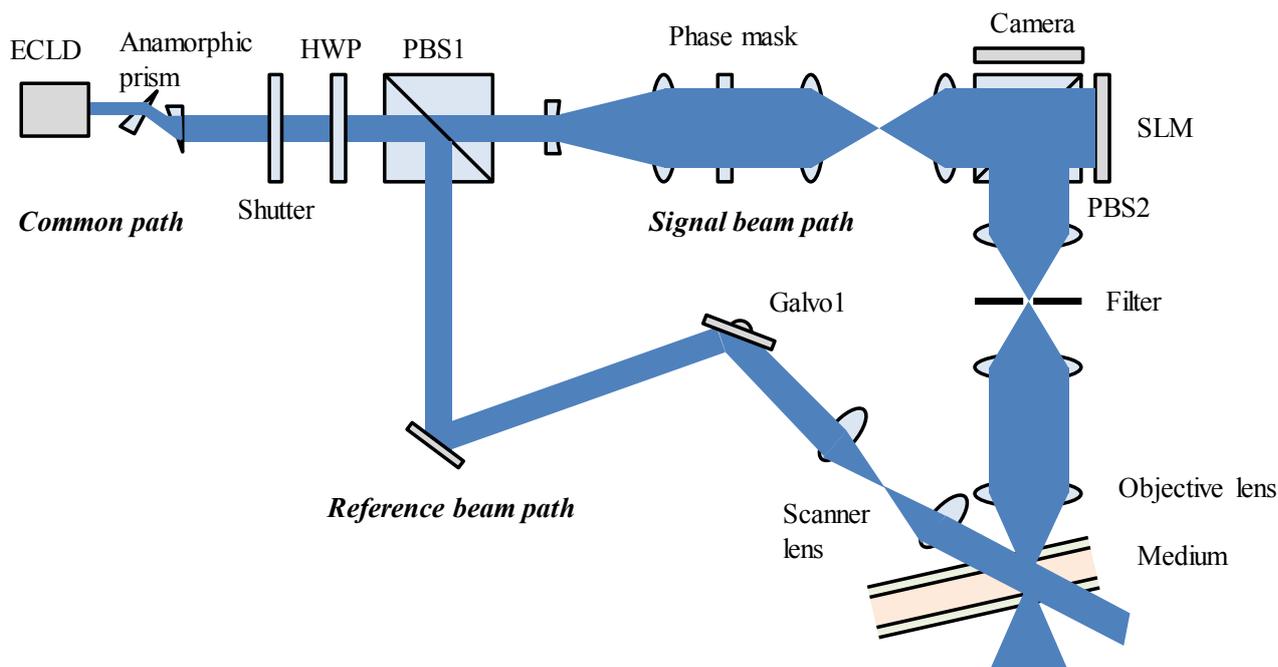


図 2.1 角度多重方式ホログラフィックメモリの基本光学系

記録密度はページデータ容量と多重数とホログラムサイズから決まる。SLM のピクセルピッチを p 、対物レンズの焦点距離を f 、対物レンズの開口数を NA と置くと、レンズの半径は $f \cdot NA$ であることから、ページデータ容量 C_p はレンズの面積をピクセルの面積で除算した式(2.1)となる。

$$C_p = \frac{\pi(f \cdot NA)^2}{p^2} \quad (2.1)$$

光源の波長を λ 、フィルタのナイキストサイズに対する面積比を F と置くと、ホログラムサイズ S_h は式(2.2)となる。

$$S_h = F \left(\frac{f\lambda}{p} \right)^2 \quad (2.2)$$

多重数を N_{page} と置くと、記録密度 C_{raw} は式(2.3)として求まる。

$$C_{raw} = \frac{N_{page} C_p}{S_h} = \frac{N_{page}}{F} \left(\frac{NA}{\lambda} \right)^2 \quad (2.3)$$

記録層の厚みを L として、後述するように多重数 N_{page} は L/λ に比例するため、比例係数を c_{page} として式(2.4)で表される。

$$C_{raw} = \frac{c_{page} L \cdot NA^2}{F \lambda^3} \quad (2.4)$$

式(2.4)より記録密度は SLM のピクセルピッチと対物レンズの焦点距離には依存しないことが分かる。また、高密度化のためには記録層の厚みを大きくすること、フィルタサイズを小さくすること、対物レンズの NA を大きくすること、波長を短くすることが有効であることが分かる。

2.2.1 ページ容量

次に、モノキュラ光学系を用いて、詳細な関係をモデル化する。図 2.2 にモノキュラ光学系の光学配置を示す。角度多重方式の基本光学系との違いは、メディアに入射する前に信号光と参照光とで対物レンズを共有する点である。このため、ページデータの形状は半円状となる。

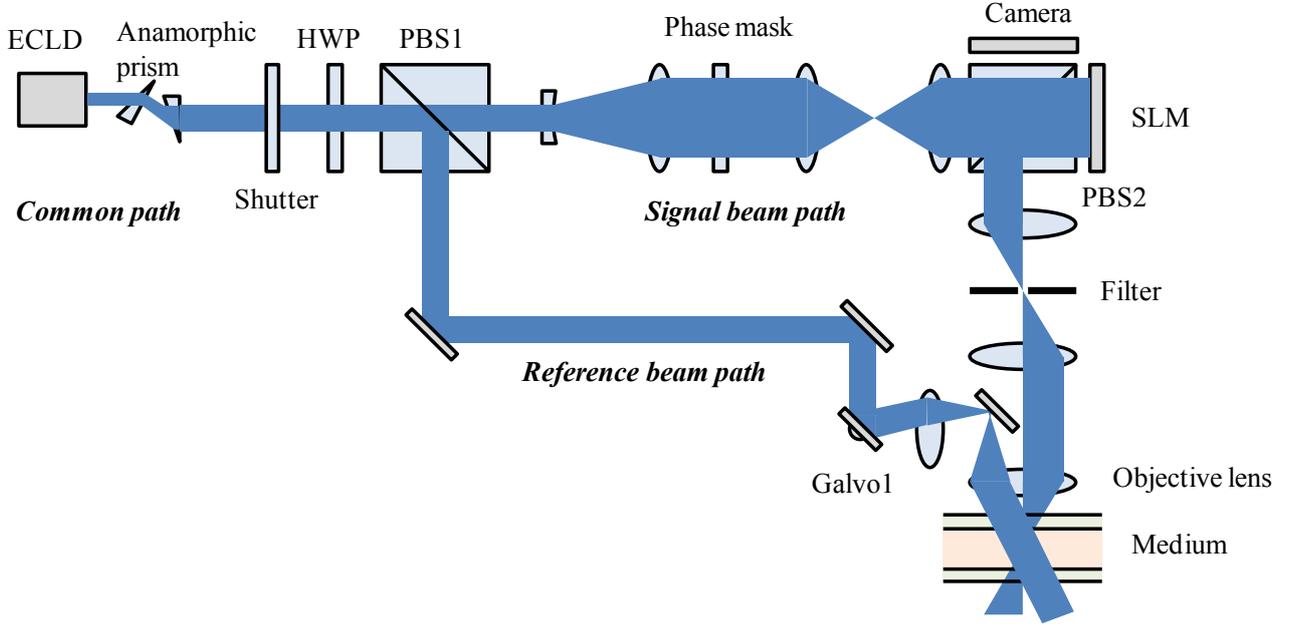


図 2.2 モノキュラ光学系の光学配置

図 2.3 にモノキュラ光学系におけるページデータ形状を示す。信号光の最外角を θ_{sigout} 、参照光の最外角を θ_{refout} と置くと、

$$\theta_{sigout} = \theta_{refout} = \sin^{-1} NA \quad (2.5)$$

基本光学系では式(2.1)のようにレンズ半径全体をページデータに利用できるものとして考えたが、実際には SLM のピクセルからの回折による拡がりがあるため、レンズ半径から回折する分を差し引く必要がある。これをレンズ有効半径 r_e として、

$$r_e = f \cdot NA - \frac{\sqrt{F} f \lambda}{2p} \quad (2.6)$$

ページデータの中心から参照光側の端までの距離を r_{in} とすると、信号光の最内角を θ_{sigin} として、

$$r_{in} = f \sin \theta_{sigin} \quad (2.7)$$

これより、半円に削られる側の頂点の成す角 θ_{in} は、

$$\theta_{in} = \cos^{-1} \frac{r_{in}}{r_e} \quad (2.8)$$

以上を用いて、モノキュラ光学系のページデータ容量 C_{pm} は式(2.9)の通り導かれる。

$$\begin{aligned} C_{pm} &= \frac{2 \left(\pi r_e^2 \frac{\pi - \theta_{in}}{2\pi} + \frac{1}{2} r_{in} r_e \sin \theta_{in} \right)}{p^2} \\ &= \frac{r_e^2 (\pi - \theta_{in} + \cos \theta_{in} \sin \theta_{in})}{p^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

なお、参照光の最内角 θ_{refin} は信号光の最内角と成す角を θ_{dead} として式(2.10)の通り設定する。

$$\theta_{refin} = \theta_{signin} + \theta_{dead} \quad (2.10)$$

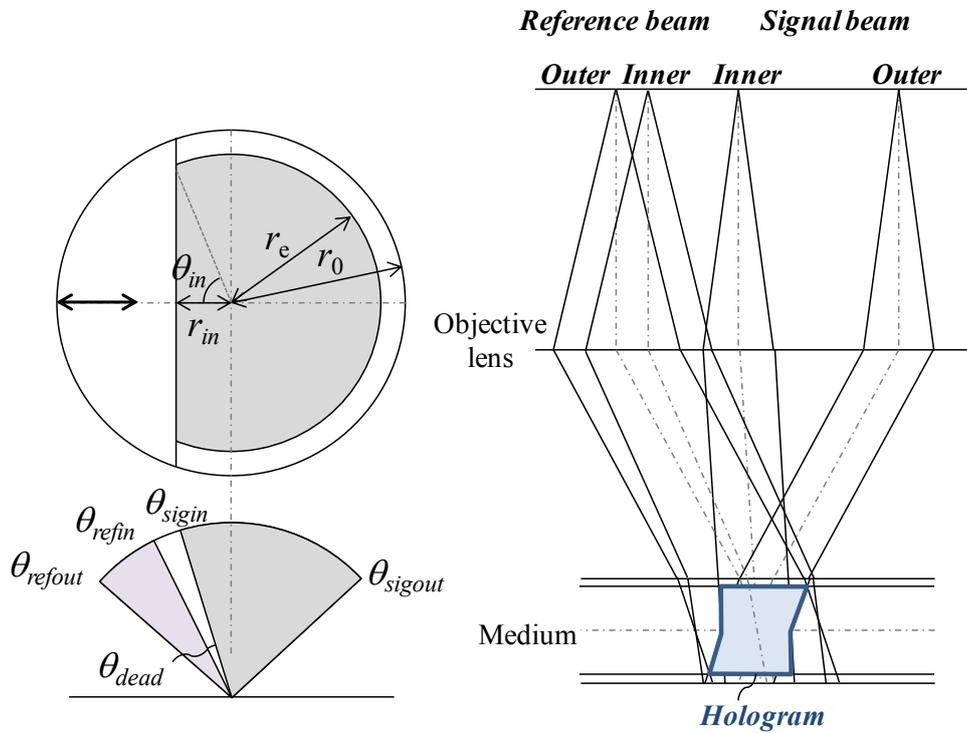


図 2.3 モノキュラ光学系におけるページデータ形状

図 2.4 に信号光最内角に対するモノキュラ光学系と通常の円形のページデータの容量を示す。算出に用いたパラメータを表 2.1 に示す。図よりモノキュラ光学系のページデータはいずれの信号光最内角においても通常の円形のページデータよりも大きい容量となり、また、信号光最内角が小さいほど、つまり、ページデータが小さいほど、その差は大きくなる事が分かる。

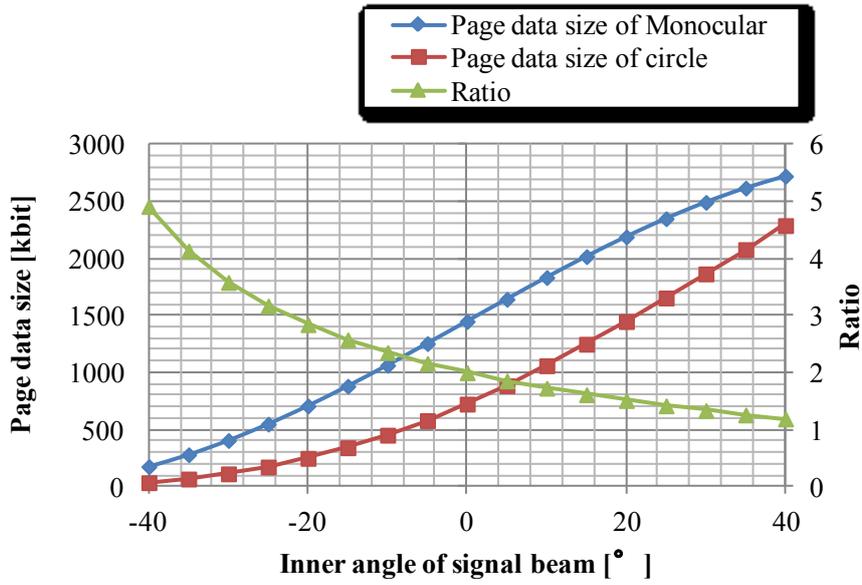


図 2.4 モノキュラ光学系と通常の円形のページデータの容量比較

表 2.1 ページデータの容量比較に用いたパラメータ

| | |
|-------------------------------------|-------|
| λ : Wavelength [nm] | 405 |
| p : Pixel pitch [μm] | 10.67 |
| f : Focal length [mm] | 12.4 |
| NA : Numerical aperture | 0.85 |

2.2.2 多重数

記録層の屈折率を n 、記録層の厚みを L 、信号光と参照光のメディア中におけるメディアの法線からの角度を θ_S' 、 θ_R' 、記録時と再生時の参照光のメディア中の角度差を $\Delta\theta_R'$ とすると、回折効率 η は、

$$\eta \propto \text{sinc}^2 \left(\frac{\pi n L \sin(\theta_R' + \theta_S')}{\lambda \cos \theta_S'} \Delta\theta_R' \right) \quad (2.11)$$

なお、信号光は最内角から最外角までの多数の異なる角度を持つため、中心角 $(\theta_{\text{sigout}} - \theta_{\text{signin}})/2$ に対応するメディア中の角度を信号光の角度として計算する。式(2.11)より、参照光の角度に応じて角度選択性が変化することが分かる。ページ間クロストーク量を一定とするため、ページ間隔を角度選択性に応じて変化させる。sinc 関数が最初に 0 となる角度を null 角と呼ぶこととして、ページ間隔を null 角の倍数 O_{null} で規定する。null 角 θ_{null} は式(2.11)の sinc 関数の変数が π となる角度であるため、これを解くと、

$$\theta_{\text{null}} = \frac{\lambda \cos \theta_S'}{n L \sin(\theta_R' + \theta_S')} \quad (2.12)$$

多重数 N_{page} を求めるには、参照光の最内角 θ_{refin} から順に $O_{\text{null}}\theta_{\text{null}}$ を参照光の最外角 θ_{refout} となるまで逐次計算する。

なお、式(2.12)より null 角は λ/L に比例することから、多重数はこの逆数である L/λ に比例することが分かる。

2.2.3 ブック数

従来の光ディスクと同様に円盤状のディスクの中央を把持し、スピンドルモータの回転とディスク半径方向の移動により、ブック位置を変えて記録するものとする。ディスクの最内周を r_{din} 、最外角を r_{dout} とすると、ブック数 N_{book} は、ディスクの有効面積をホログラムサイズで除算して、式(2.13)で表される。

$$N_{book} = \frac{\pi(r_{dout}^2 - r_{din}^2)}{S_h} = \frac{\pi(r_{dout}^2 - r_{din}^2)}{F} \left(\frac{p}{f\lambda}\right)^2 \quad (2.13)$$

符号変調や ECC(Error Correction Code)の付加による符号化率を R_{rate} とすると、ディスク 1 枚当たりのユーザデータ容量 C_u は式(2.13)を用いて求めることができる。

$$C_u = R_{rate} C_{pm} N_{page} N_{book} \quad (2.14)$$

2.3 転送速度のモデル化

1 ページの記録露光時間を t_{won} 、ページ間の移動時間を t_{woff} 、ブック間の移動時間を t_{wbook} と置くと、1 枚のディスクを記録するのに要する時間 T_w は、

$$T_w = N_{page} N_{book} (t_{won} + t_{woff}) + N_{book} t_{wbook} \quad (2.15)$$

転送速度 R_w はディスク 1 枚の容量を、記録するのに要する時間で除算することにより求まるため、

$$R_w = \frac{C_u}{T_w} = \frac{R_{rate} C_{pm} N_{page} N_{book}}{N_{book} N_{page} (t_{won} + t_{woff}) + N_{book} t_{wbook}} = \frac{R_{rate} C_{pm}}{t_{won} + t_{woff} + \frac{t_{wbook}}{N_{page}}} \quad (2.16)$$

ここで、定性的な理解のため、複雑な C_{pm} の代わりに式(2.1)の C_p を式(2.16)に代入すると、

$$R_w = \frac{\pi(f \cdot NA)^2}{p^2} \frac{R_{rate}}{t_{won} + t_{woff} + \frac{t_{wbook}}{N_{page}}} \quad (2.17)$$

式(2.17)より、転送速度を向上させるためには、記録露光時間、ページ間の移動時間、ブック間の移動時間を小さくすることが必要であるが、その他にも焦点距離と NA を大きくすること、およびピクセルピッチを小さくすることが重要であることが分かる。これはページデータ容量が大きくなるためである。前節では焦点距離とピクセルピッチは容量に影響しないことを述べたが、転送速度には影響することにシステム設計時に注意が必要である。また、多重数を増やすことも転送速度の向上に有効である。これは多重数が増えるほど、相対的にブック間の移動時間を無視できるようになるためである。なお、多重数は波長に反比例、メディア厚みに比例するため、波長が短く、メディアが厚いほど、転送速度の向上につながる。

以上、記録時を想定した転送速度について論じたが、再生時も考え方は同様である。

2.4 媒体ダイナミックレンジのモデル化

ホログラフィックメモリでは干渉縞を屈折率分布としてメディアに記録する。したがって、屈折率差が大きいほど、大容量の記録が可能となる。このメディアの屈折率のダイナミックレンジは $M/\#$ と呼ばれる。一般的には平面波テスタにより角度多重を行い、どれだけの回折効率の多重ができるかで $M/\#$ は測定され、個々のホログラムの回折効率を η_i (i は整数), 式(2.18)で定義される。

$$M/\# = \sum_{i=1}^{N_{page}} \sqrt{\eta_i} \quad (2.18)$$

フォトポリマー材料では干渉縞の明部でモノマーが重合することによってポリマー化し、マトリックスと呼ぶ基材との屈折率差が記録される。一般的に $M/\#$ を増やすためにはモノマーの量を増やすか、モノマーとマトリックスとの屈折率差を大きく取ることが必要である。モノマーの量を増やすと、重合時の収縮も大きくなり、記録品質の低下を招く。また、モノマーとマトリックスの屈折率差については材料の制限があり、飛躍的に向上させることは難しい。このことから、ホログラフィックメモリの大容量化においては、メディア開発だけでなく、システム側でいかに $M/\#$ 消費を抑えるかを考慮することが重要である。

記録時の信号光と参照光のエネルギー密度を I_{sigw} , I_{refw} とすると、干渉縞の変調度 m は、

$$m = \frac{2\sqrt{I_{sigw}I_{refw}}}{I_{sigw} + I_{refw}} \quad (2.19)$$

変調度 m は干渉の程度を表し、信号光と参照光のエネルギー密度が同一のとき、最も高く 1 となる。

メディア感度を S_{med} , 記録層の厚みを L , とすると、回折効率 η は、

$$\sqrt{\eta} = m(I_{sigw} + I_{refw})S_{med}L = 2\sqrt{I_{sigw}I_{refw}}S_{med}L \quad (2.20)$$

したがって、信号として記録される $M/\#$ を $M\#_{sig}$ として、厚みで正規化すると、

$$M\#_{sig} = \frac{N_{page}\sqrt{\eta}}{L} = 2N_{page}S_{med}\sqrt{I_{sigw}I_{refw}} \quad (2.21)$$

実際に消費される $M/\#$ は変調度に関わらず、投入されたエネルギーに応じて消費される。信号光と参照光がオーバーラップするホログラムの部分で消費される $M/\#$ を $M\#_{holo}$ として、

$$M\#_{holo} = \frac{N_{page}(I_{sigw} + I_{refw})S_{med}L}{L} = N_{page}S_{med}(I_{sigw} + I_{refw}) \quad (2.22)$$

さらに、角度多重方式では信号光と参照光がオーバーラップしホログラムとして記録される箇所以外にも、参照光のみが照射される箇所がある。このような部分においてもモノマーはポリマー化されてしまうため、 $M/\#$ を消費してしまう。図 2.5 に記録媒体断面におけるホログラムの幾何形状を示す。信号光の最外角のピクセルのホログラムと参照光がオーバーラップすれば、全てのピクセルのホログラムとオーバーラップし、また、参照光が最外角のとき、最もブラッグ方向に参照光サイズが大きくなる。メディア中の信号光と参照光の最外角を θ'_{sigout} , θ'_{refout} とすると、ブラッグ方向の参照光の幅 L_{refB} は、

$$L_{refB} = \sqrt{S_h} + L(\tan\theta'_{sigout} + \tan\theta'_{refout}) \quad (2.23)$$

縮退方向に完全にオーバーラップさせるためには、縮退方向の参照光の幅を L_{refD} として、

$$L_{refD} = \sqrt{S_h} + 2L \tan \theta'_{sigout} \quad (2.24)$$

以上から、参照光のみが照射される部分での M/#消費 $M\#_{ref}$ は、

$$M\#_{ref} = \frac{N_{page}}{L} E_{refw} \frac{L_{refB} L_{refD} - S_h}{S_h} S_{med} L = N_{page} S_{med} E_{refw} \frac{L_{refB} L_{refD} - S_h}{S_h} \quad (2.25)$$

式(2.22)(2.25)より実際に消費される M/#を $M\#_{req}$ として、

$$M\#_{req} = M\#_{holo} + M\#_{ref} = N_{page} S_{med} E_{refw} \left(E_{sigw} + E_{refw} + \frac{L_{refB} L_{refD} - S_h}{S_h} \right) \quad (2.26)$$

実際に消費する M/#に対する信号に寄与する M/#の比率を M/#利用効率 $M\#_{eff}$ として、

$$M\#_{eff} = \frac{M\#_{sig}}{M\#_{req}} = \frac{I_{sigw}}{I_{refw}} \frac{2}{I_{sigw} + I_{refw} + \frac{L_{refB} L_{refD} - S_h}{S_h}} \quad (2.27)$$

$$= \frac{I_{sigw}}{I_{refw}} \frac{2}{I_{sigw} + I_{refw} + \frac{pL}{\sqrt{F}} \lambda (3 \tan \theta'_{sigout} + \tan \theta'_{refout}) + \frac{p^2 L^2}{F f^2 \lambda^2} \tan \theta'_{sigout} (\tan \theta'_{sigout} + \tan \theta'_{refout})}$$

式(2.27)は複雑であるため、パラメータとの関係が分かりづらいが、ホログラムサイズが大きいくほど、また、メディアの厚みが薄いほど利用効率が高まる。また、NA が小さいほど θ'_{sigout} と θ'_{refout} は小さくなるため、利用効率が高まる。これらは、いずれも参照光による無駄な M/#消費がなくなるためである。

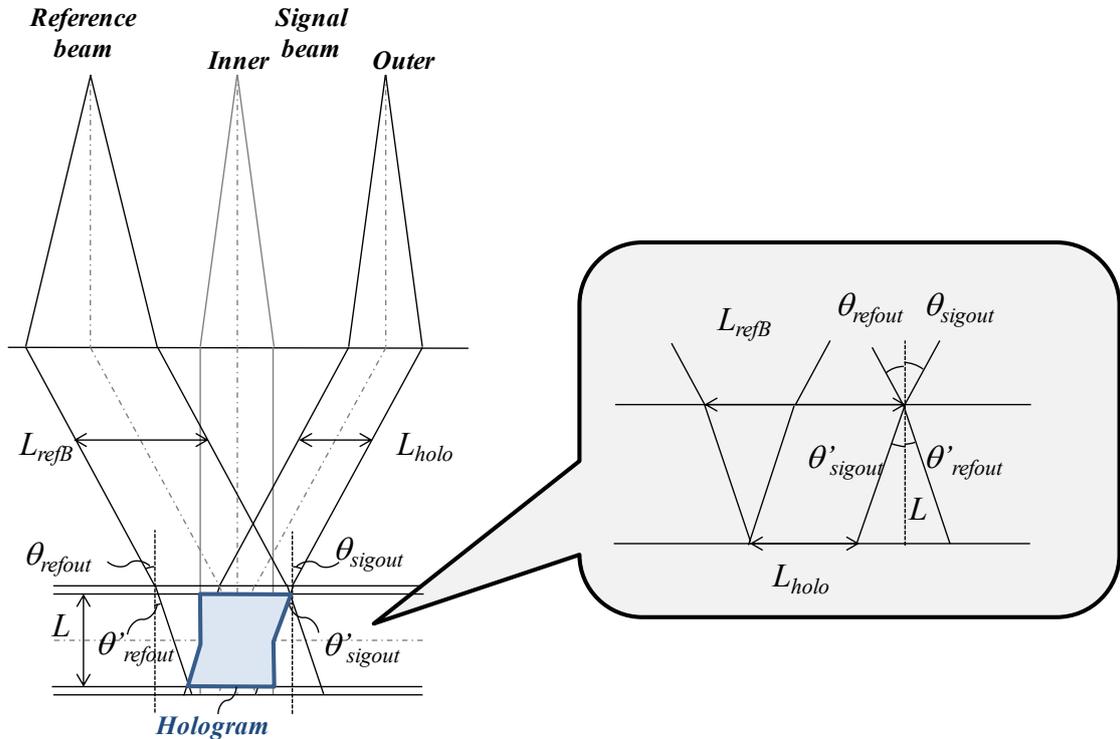


図 2.5 ホログラムの幾何形状

ここで主要なシステムパラメータと記録密度、転送速度、M/#消費の関係を表 2.2 にまとめる。表中は各パラメータの次数で影響度を表している。また、関係性が複雑で次数で表せないものについては、次数の正負のみ示し

ている。

表 2.2 主要なシステムパラメータと記録密度, 転送速度, M/#消費の関係

| | Recording density | Data transfer rate | M/# efficiency |
|---------------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| λ : Wavelength | -3 | Negative | Positive |
| L : Medium thickness | 1 | Positive | Negative |
| p : Pixel pitch | 0 | -2 | Negative |
| f : Focal length | 0 | 2 | Positive |
| NA : Numerical aperture | 2 | 2 | Negative |

2.5 SNR のモデル化

2.5.1 シミュレータ概要

SNR を計算するためには, クロストーク性ノイズ, メディアノイズ, カメラノイズといったノイズを扱う必要があり, 解析的には扱いづらいため, シミュレータを構築し計算した。

図 2.6 にシミュレータの処理フロー概要を示す。記録過程は SLM の像をフーリエ変換し, フィルタを作用させることによりホログラム位置での複素振幅を計算する。再生過程はホログラム位置の複素振幅を逆フーリエ変換し, カメラ面における複素振幅を計算する。複数のページ記録とブック記録の影響を計算するために, 以上をループ処理する。

クロストーク性ノイズの考え方については次節で述べる。メディアノイズはコヒーレントなノイズであり, 記録後のホログラム位置での複素振幅全体のパワーに対してノイズを複素振幅で印加する。カメラノイズはインコヒーレントなノイズであり, カメラ面で複素振幅の絶対値を二乗することによりパワーを求め, これに対してダークノイズと光ショットノイズを印加する。ダークノイズは暗電流ノイズともいい, 光が無い状態でも発生するノイズである。光ショットノイズは不規則なゆらぎに起因し, カメラの各ピクセルで光電変換した電子数の平方根で平均電子数を計算する。

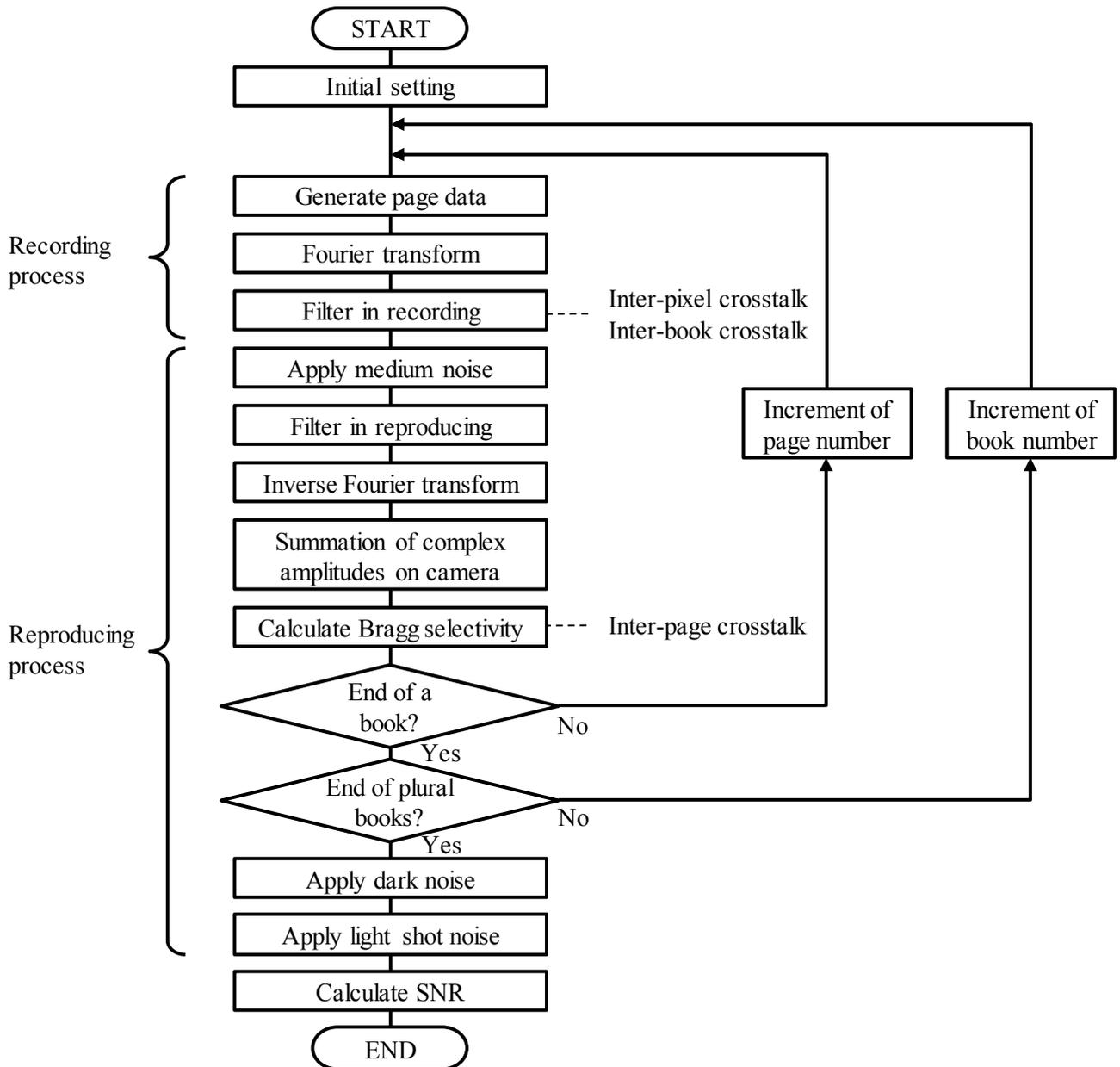


図 2.6 シミュレータの処理フロー概要

2.5.2 クロストークのモデル化

角度多重方式におけるクロストークにはピクセル間クロストーク、ページ間クロストーク、ブック間クロストークの 3 種類がある。本研究ではそれぞれの応答をシミュレーションにより計算することでノイズを算出する。

ピクセル間クロストーク

ピクセル間クロストークを計算するためには、ピクセルの応答が計算できれば良い。図 2.7 にピクセル応答の計算方法を示す。信号光はレンズによるフーリエ変換の作用を受け、フーリエ面において、フィルタで矩形に切り取

られる。その後、一度レンズによる逆フーリエ変換の作用により像面となり、再度対物レンズによるフーリエ変換の作用を受けてメディアに記録される。したがって、フィルタ位置とメディアの中心位置はともにフーリエ面であり等価の関係となる。ピクセル応答を計算するには、SLMの像面でページデータをSLMの1ピクセルを複数の計算ピクセルで表現し、これをフーリエ変換し、フィルタサイズで切り取る操作をすれば良い。

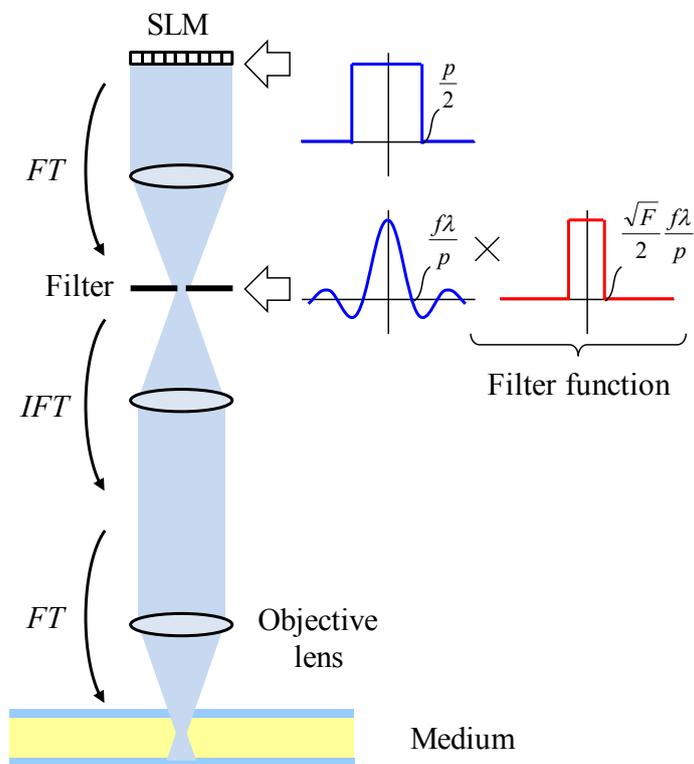


図 2.7 ピクセル応答の計算方法

図 2.8 にピクセル応答のシミュレーション結果を示す。実線はシミュレーション結果、破線は比較のため再生像にホログラムサイズで決まる応答を畳み込みにより計算した結果である。両者は良く一致しており、シミュレーション結果は妥当であると考えられる。

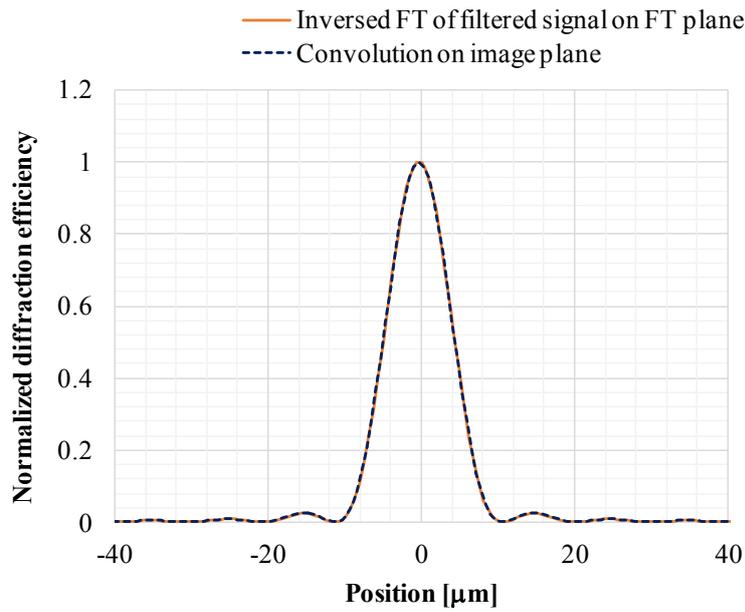


図 2.8 ピクセル応答のシミュレーション結果

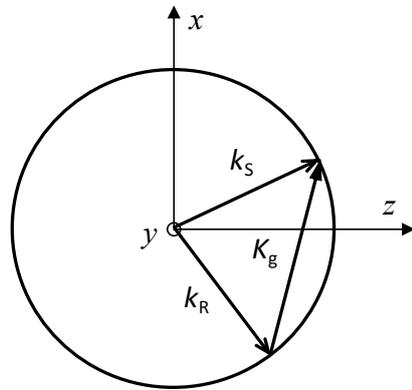
ページ間クロストーク

ページ間クロストークを計算するには、記録と再生での参照光の角度ずれに対する回折効率の応答を計算できれば良い。図 2.9 に k ベクトル法を示す。記録時に信号光の波数ベクトル k_s と参照光の波数ベクトル k_R によって格子ベクトル K_g が記録される。再生時の参照光 k_p で再生されると、 $k_p + K_g$ と回折光ベクトル k_d との差分ベクトル δk_d の sinc 関数として回折光の振幅が計算される。

$$\eta \propto \text{sinc}^2\left(\frac{L\delta k_d}{2\pi}\right) = \text{sinc}^2\left(\frac{L(K_g + k_p - k_d)}{2\pi}\right) \quad (2.28)$$

信号光は SLM 上の位置に応じて、異なる波数ベクトルとなるため、再生したページデータの各位置に応じて式 (2.28) を計算し、再生像に重畳することで参照光角度ずれの応答を計算する。

(a) Recording of grating K_g by plane waves k_R, k_S



(b) Reading with rotated reference beam k_p

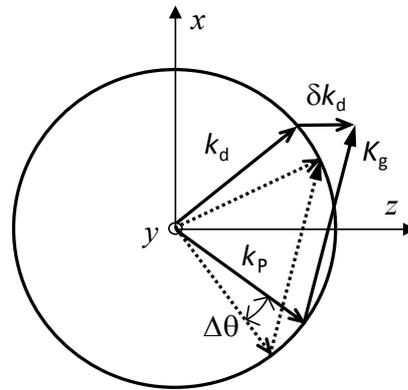


図 2.9 k ベクトル法

図 2.10 に再生時の参照光角度ずれに対する応答のシミュレーション結果を理論値と比較した結果を示す。Simulation 1 はページデータを 10×10 ピクセルとして、ほぼ単一の信号角度と見なせる場合の結果であり、これに対応する理論値と良く一致している。Simulation 2 は 400×400 ピクセルのページデータの結果であり、null 付近の応答が Simulation 1 と異なるのはページ内で複数の信号光角度を持っており、全体の角度選択性が異なる角度選択性の重ね合わせとなるためである。グラフ中の再生像は Simulation 2 によるものであり、ページ内の角度選択性の違いを表現できていることが分かる。

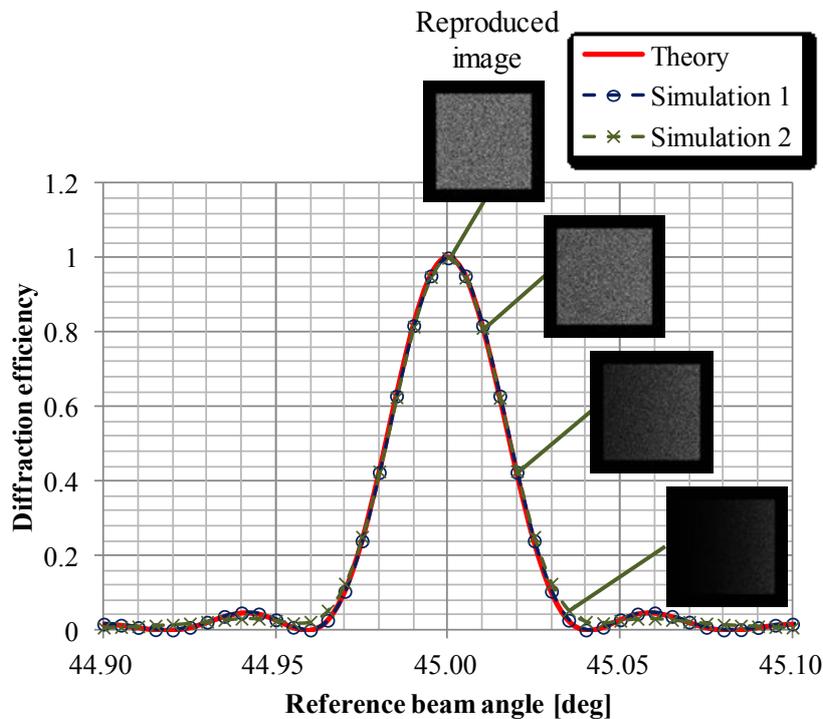


図 2.10 再生時の参照光角度ずれに対する応答のシミュレーション結果

ここで、信号品質として用いる SNR について定義する。図 2.11 に信号品質を算出するために用いる輝度のヒストグラムを示す。On ピクセルと Off ピクセルの輝度に対するヒストグラムを算出し、On ピクセルと Off ピクセルの分布の平均値を μ_{on} , μ_{off} , On ピクセルと Off ピクセルの分布の標準偏差を σ_{on} , σ_{off} として、SNR を式(2.29)で定義する。

$$SNR = 20 \log \frac{\mu_{on} - \mu_{off}}{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}} \quad (2.29)$$

On ピクセルと Off ピクセルの平均輝度の差分が信号成分、それぞれの標準偏差の RMS(Root Mean Square: 二乗和平方根)がノイズ成分となっており、信号成分が大きい、もしくはノイズ成分が小さい、すなわち、On ピクセルと Off ピクセルの分布の分離がしやすいほど、SNR は大きくなり、信号品質が良好であることを示す。

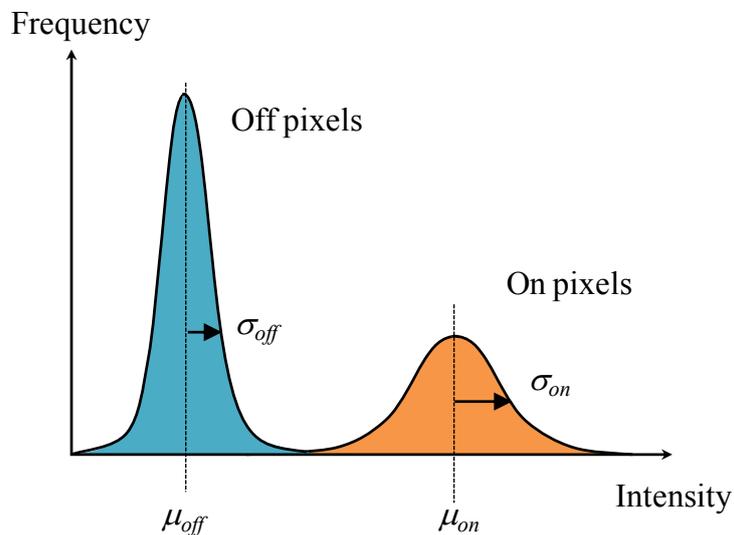


図 2.11 信号品質算出のための輝度のヒストグラム

図 2.12 にページ間クロストークの角度依存性を示す。グラフの実線は 2 ページの角度間隔を変えた記録再生した SNR, 破線は比較のため 1 ページを記録再生した SNR を示す。2 ページ記録ではページ間隔が大きくなる程 1 ページの SNR に近づき、クロストークが小さくなることから分かる。ページ間クロストークの影響をシミュレーションにより検討する際に、ページ数が多いほど、シミュレーション時間が長くなるため、適性に評価ができる範囲内でページ数を減らした評価を行いたい。1°離れるとほぼ 1 ページの記録品質と等価となるため、以降の検討においては、ページ間クロストークは 1°の範囲で影響を検討することとする。

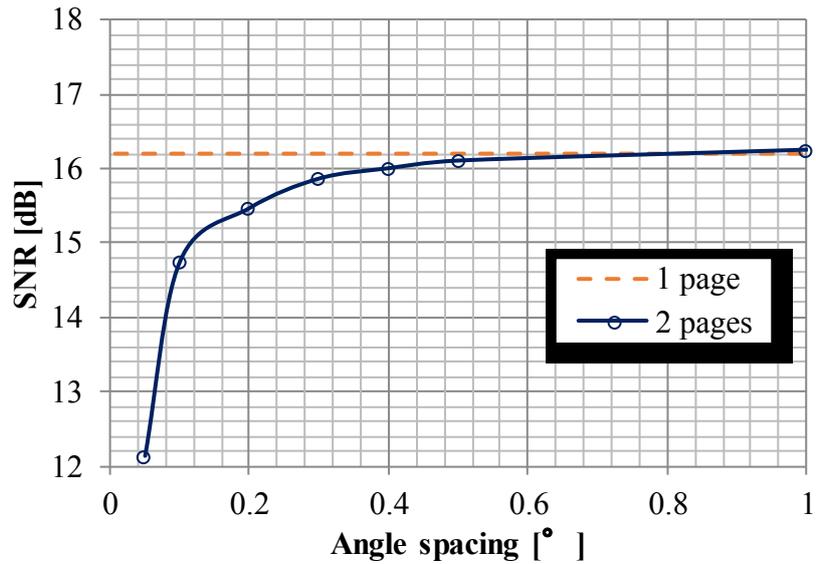


図 2.12 ページ間クロストークの角度依存

ブック間クロストーク

ブック間クロストークを計算するにはブックの応答を計算できれば良い。ピクセル応答の考え方で述べたように、フィルタとメディアのフーリエ面とは等価な関係にある。したがって、フーリエ面における位置ずれと、フィルタによる切り取りを計算する。位置ずれには記録時の位置ずれと再生時の位置ずれがあるため、シミュレータには両者を実装した。

図 2.13 はブック応答のシミュレーション結果である。フィルタサイズ分だけ移動すると回折光量が 0 となるため、妥当な結果である。フィルタサイズの半分の移動で光量が急峻に減少するのはホログラム中央の強度の高い直流成分がフィルタで遮蔽されるためである。

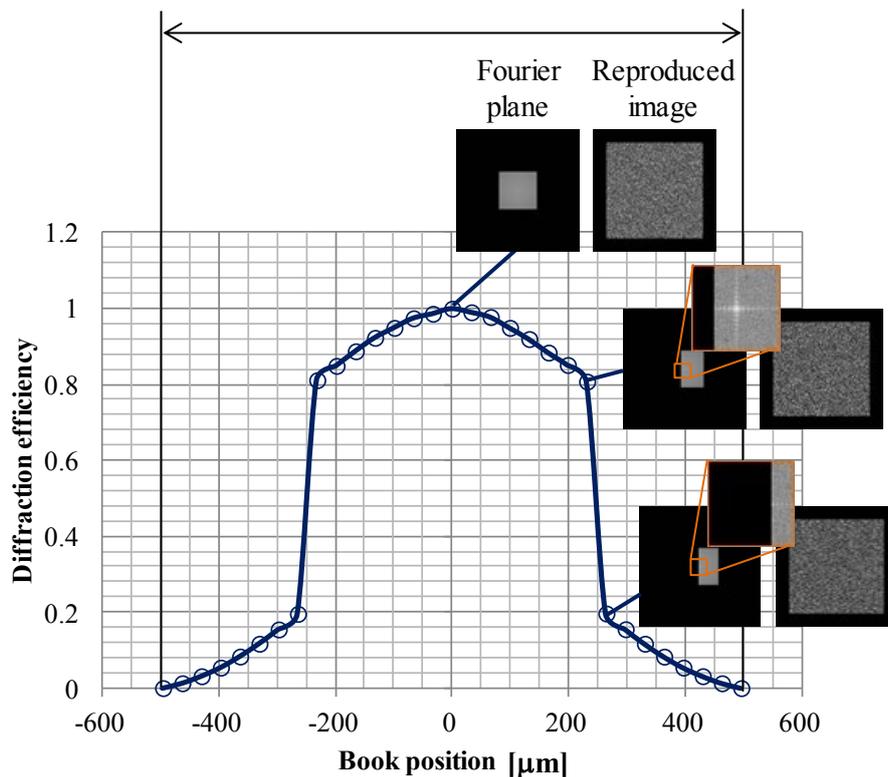


図 2.13 ブック応答のシミュレーション結果

角度多重方式ホログラフィックメモリにおいて高密度化する上では、3つのクロストークの適切な配分が重要である。クロストークのうち、ピクセル間クロストークはフィルタにより発生し、フィルタサイズを小さくする、すなわち、ホフーリエ面のログラムサイズを小さくするほど大きくなる。ブック間クロストークはブックの重なり、つまり、フーリエ面のホログラムの重なりによって発生し、重なりが大きいほど大きくなる。図 2.14 にフーリエ面におけるピクセル間クロストーク増加とブック間クロストーク増加の様子を模式図で示す。図ではいずれも高密度化の効果としては同一であるため、SNR の劣化が少ない方を採用するべきである。

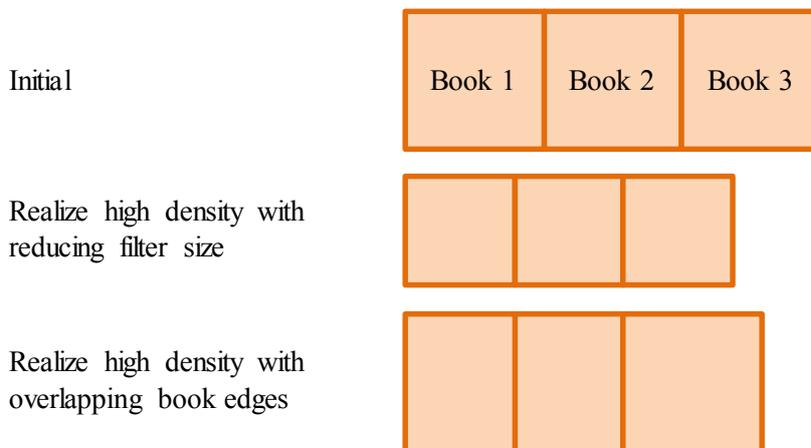


図 2.14 フーリエ面におけるピクセル間クロストーク増加とブック間クロストーク増加

図 2.15 にフィルタサイズ縮小により高密度化しピクセル間クロストークが増加する場合とブック同士をオーバーラップさせて高密度化しブック間クロストークが増加する場合の影響をシミュレーションにより比較した結果を示す。図より同じ記録密度向上の結果を得るためにはピクセル間クロストークを増加させる方がブック間クロストークを増加させるよりも SNR の劣化が小さいことが分かる。したがって、以降の検討では、ブック間クロストークは許容せず、ピクセル間クロストークとページ間クロストークの配分を考えることとする。

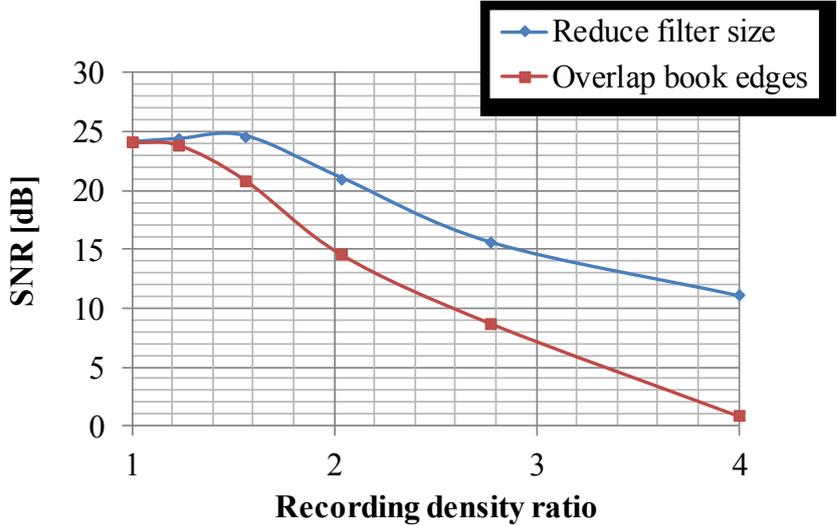


図 2.15 ピクセル間クロストーク増加とブック間クロストーク増加による高密度化の影響比較

2.6 振動のモデル化

ホログラフィックメモリにおいて振動の影響対策は最重要課題の一つである。波長のオーダーである数百 nm の振幅の振動であっても干渉縞を乱してしまうため^[36]、ホログラムの記録中には機械的に安定した環境が要求される。

再生時の振動の影響はインコヒーレントな光量の積算のため、振動そのものの影響は小さく、振動の振幅平均値がブラッグ条件を満足していることが重要となる。厚いホログラムでは高い角度選択性のため、ディスクチルトや参照光の角度ずれは 0.01° 以下に抑える必要があり、サーボ制御することが有効である^{[37][38][39]}。特にホログラムの回転は再生像に影響を与えるため、ディスクの動きに対する補償とサーボ制御が研究されている^[40]。Kim らは隣接した記録済みのデータを利用した参照光のサーボ信号生成方法について提案している^[38]。Hoskins らは再生したページを用いた参照光のブラッグ方向の角度、縮退方向の角度、波長の補償方法を提案している^[20]。また、同様の原理を基に連続してページデータを再生する方法を開発している^[41]。Matsumura らはディスクを回転方向にずらすことによりラジアル方向のチルトを補償する方法を提案している^[37]。Lee らは RF 信号のレベルに応じてトラッキング制御を切り替える方法を提案している^[42]。以上のように再生時には回折光を用いた補償方法やサーボ制御により再生信号の品質を確保することが可能である。

記録時の振動の影響は干渉縞の形成そのものに影響するため、より重要である。干渉縞が振動により滲んでし

まった場合、再生時に品質を回復することは一般的には難しい。

記録時の振動の問題はサーボ制御により安定化すること^{[43][44][45]}や、装置構成によりディスクを強固に把持すること^[46]が提案されている。Yang らは記録媒体の振動を検出するために追加の光線を適用する方法を提案している^{[47][48]}。Lim らはトラッキング制御のための予め形成したパターンを用いることを提案している^[49]。堀米らは予め形成したピットに対して記録再生とは異なる波長を用いてサーボ信号を生成することを提案している^[50]。

記録時のサーボ制御手法については多くの研究があるものの、振動がシステムのパフォーマンスに与える影響についての研究は少なく、また解析的に明らかになっていない。振動が信号品質に与える影響の理解が不足していると必要以上に複雑で制約が多く、十分な転送速度が確保できないシステムになってしまう可能性がある。例えば、従来、振動が発生した場合に記録停止をする処理として振動振幅の閾値を設ける方法が提案されているが^[51]、どのような振動波形であっても、振幅が閾値を超えれば記録停止してしまうため、記録転送速度を必要以上に犠牲にしている。

本節ではホログラム記録時の振動の影響を適切に評価するための参照光の角度方向の振動 2 軸とディスクのシフト方向の振動 3 軸の合計 5 軸の方向の振動をモデル化する。

2.6.1 参照光の波数ベクトル

本項では参照光の角度方向の振動とディスクのシフト方法の振動について時間平均ホログラム^{[52][53]}の手法に基づいてモデル化する。図 2.16 に参照光とディスクの振動方向の定義を示す。(a)は参照光と信号光とが成す平面上で表されており、 θ はディスク平面の法線から参照光の多重方向にとった角度、 x はディスク回転の接線方向、 z はデフォーカス方向を表す。(b)は信号光と参照光の成す平面とディスク平面とに対して垂直な平面上で表されており、 ϕ は θ に垂直な縮退方向の角度、 y はディスクの半径方向を表す。

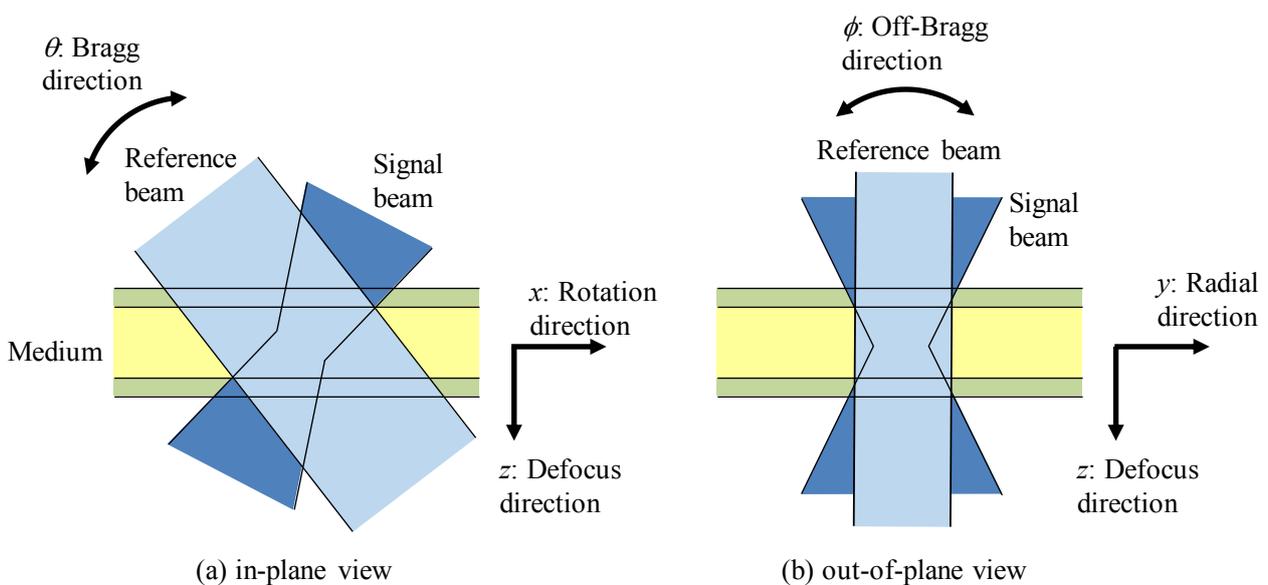


図 2.16 振動方向の定義

図 2.17 はエワルド球における空気中と媒体中の参照光の波数ベクトルを模式的に示した図である。波数ベクトルの x と y 方向の成分は空気と媒体の間で保存される。

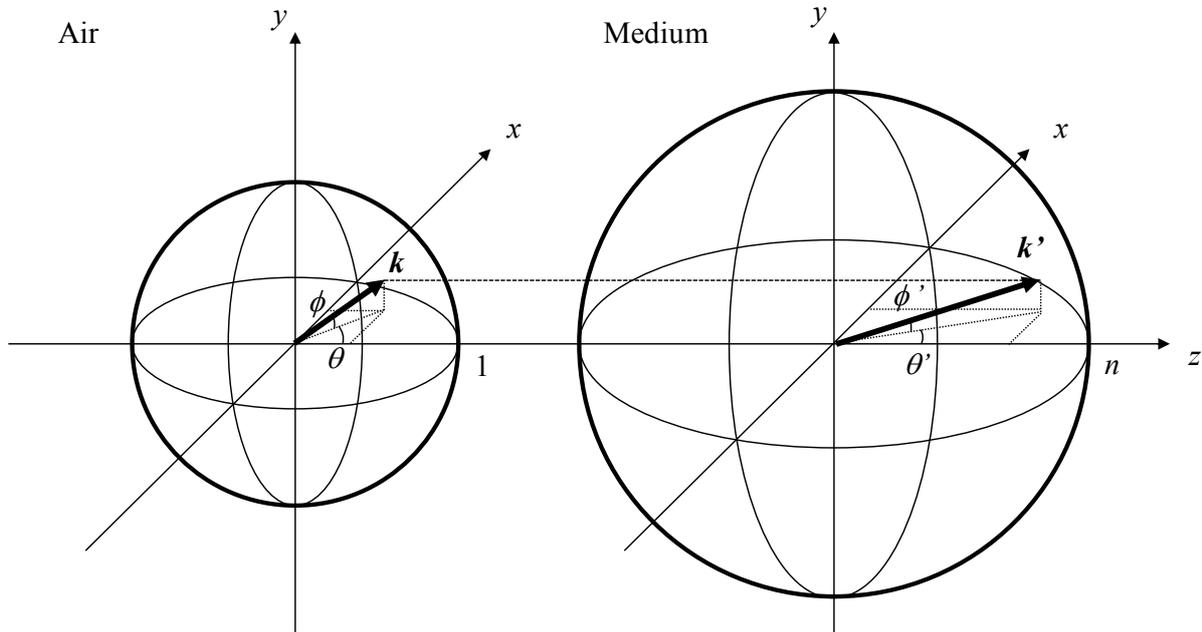


図 2.17 空気中と媒体中における参照光の波数ベクトル

空気中の波数ベクトルの x , y , z 方向の成分は次式を満足する。

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (2.30)$$

ここで、 λ は波長であり、波数ベクトルの各成分は次式で表される。

$$\begin{aligned} k_x &= \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cos\phi \cdot \sin\theta \\ k_y &= \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sin\phi \\ k_z &= \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cos\phi \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (2.31)$$

ここで、 ϕ は波数ベクトルと x - z 平面上に投影された波数ベクトルとが成す角、 θ は x - z 平面状に投影された波数ベクトルと z 軸との成す角を表す。

媒体中の波数ベクトルの x , y , z 方向の成分は n を媒体の屈折率として、次式を満足する。

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z'^2 = \left(\frac{2\pi n}{\lambda}\right)^2 \quad (2.32)$$

式(2.30)(2.31)(2.32)から媒体中の波数ベクトルの z 成分を求めると

$$k_z' = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \quad (2.33)$$

以上で求めた波数ベクトルを用いて媒体中の参照光は次式で表現できる。

$$\begin{aligned}
R_w &= A \cdot \exp[j(k_x x + k_y y + k'_z z)] \\
&= A \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos\phi \sin\theta \cdot x + \sin\phi \cdot y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot z \right)\right]
\end{aligned} \tag{2.34}$$

ここで、 A は参照光の振幅を表す。

2.6.2 参照光の振動のモデル化

参照光の ϕ , θ , x , y , z 方向の微小な振動を $\Delta\phi$, $\Delta\theta$, Δx , Δy , Δz とすると、参照光は次式で表される。

$$\begin{aligned}
R_w &= A \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos(\phi + \Delta\phi) \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot (x + \Delta x) + \sin(\phi + \Delta\phi) \cdot (y + \Delta y) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sqrt{n^2 - \cos^2(\phi + \Delta\phi) \sin^2(\theta + \Delta\theta) - \sin^2(\phi + \Delta\phi)} \cdot (z + \Delta z) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

式(2.35)を加法定理を用いて展開し、平方根内をテイラー展開し、角度振動が微小で $\Delta\phi \ll 1$ かつ $\Delta\theta \ll 1$ とした場合に $\sin\Delta\phi \sim \Delta\phi$, $\sin\Delta\theta \sim \Delta\theta$, $\cos\Delta\phi \sim 1$, $\cos\Delta\theta \sim 1$ と近次できることを用い、 $\Delta\phi^2$, $\Delta\theta^2$ といった2次以上の高次成分を無視すると、式式(2.35)は式(2.36)のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}
R_w &= A \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos\phi \sin\theta \cdot x + \sin\phi \cdot y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot z \right. \right. \\
&\quad + \cos\phi \sin\theta \cdot \Delta x + \sin\phi \cdot \Delta y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot \Delta z \\
&\quad + \left(\cos\phi \cos\theta \cdot x - \frac{\cos^2\phi \sin\theta \cos\theta}{\sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi}} \cdot z \right) \cdot \Delta\theta \\
&\quad \left. \left. + \left(-\sin\phi \sin\theta \cdot x + \cos\phi \cdot y - \frac{\sin\phi \cos\phi \cos^2\theta}{\sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi}} \cdot z \right) \cdot \Delta\phi \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

厚いホログラムからの回折は多数の薄い層に分割した各層からの回折のコヒーレントな積算で近似できるものとして扱う層分割法^[54]を適用する。参照光の振動がある状態で記録されたホログラムから再生された回折光の複素振幅を P とする。 P_m を層分割法における各層から再生された複素振幅、 $R_{w,m}$, $S_{w0,m}$, $R_{r0,m}$ をそれぞれ各層における記録時の参照光、記録時の信号光、再生時の参照光として、 c を定数、 L を媒体の厚み、 t_r を記録時の露光時間、 N を層分割の層数とすると、 P は次式で表される。

$$P = \sum_{m=1}^N P_m = j \frac{2\pi c L}{\lambda N} \sum_{m=1}^N \left(\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} R_{w,m}^* dt \right) \cdot S_{w0,m} \cdot R_{r0,m} \tag{2.37}$$

ここで、記号*は複素共役を示すものとする。

振動が無い状態での参照光は次式で表される。

$$R_{w0,m} = A \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos\phi \sin\theta \cdot x + \sin\phi \cdot y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot z_m \right) \right] \tag{2.38}$$

振動を表す重み係数は次式で表される。

$$\begin{aligned}
f_{wf,m} = & \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\phi \sin\theta \cdot \Delta x + \sin\phi \cdot \Delta y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot \Delta z) \right] \\
& \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \cos\phi \cos\theta \left(x - \frac{\cos\phi \sin\theta}{\sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi}} \cdot z_m \right) \cdot \Delta\theta \right] \\
& \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(-\sin\phi \sin\theta \cdot x + \cos\phi \cdot y - \frac{\sin\phi \cos\phi \cos^2\theta}{\sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi}} \cdot z_m \right) \cdot \Delta\phi \right] dt
\end{aligned} \tag{2.39}$$

式(2.37)の時間平均をしている項は式(2.38)(2.39)を用いて、次式で表される。

$$\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} R_{w,m}^* dt = R_{w0,m} \cdot f_{wf,m} \tag{2.40}$$

振動が無い状態で各層から再生される回折光の複素振幅を $P_{0,m}$ は次式で表される。

$$P_{0,m} = j \frac{2\pi cL}{\lambda N} R_{w0,m}^* \cdot S_{w0,m} \cdot R_{r0,m} \tag{2.41}$$

以上の関係より、回折光 P は、各層の回折光を振動が無い状態の回折光に重み係数を乗算で表し、全層で総和を取ることに、式(2.42)の通り導出できる。

$$P = \sum_{m=1}^N P_{0,m} \cdot f_{wf,m}^* \tag{2.42}$$

2.6.3 ディスクのシフト方向の振動のモデル化

ディスクのシフト方向の振動は参照光と信号光とが同時にシフト方向に振動しているものとしてモデル化する。式(2.37)に対して、記録時の信号光も時間平均ホログラムの対象となる点が異なり、回折光は次式で表される。

$$P = \sum_{m=1}^N P_m = j \frac{2\pi cL}{\lambda N} \sum_{m=1}^N \left(\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} R_{w,m}^* dt \cdot S_{w0,m} \right) \cdot R_{r0,m} \tag{2.43}$$

ホログラムがフーリエ変換ホログラムとして記録されている場合、カメラ上の回折光の複素振幅 P_{CAM} は次式で計算できる。

$$\begin{aligned}
P_{CAM} &= \mathcal{F}[P] \\
&= j \frac{2\pi cL}{\lambda N} \cdot \mathcal{F} \left[\sum_{m=1}^N \left[\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} R_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z)^* \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \times S_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z) dt \right] \cdot R_{r0,m}(x, y, z_m) \right] \\
&= j \frac{2\pi cL}{\lambda N} \cdot \frac{1}{t_r} \sum_{m=1}^N \int_0^{t_r} \left\{ \mathcal{F} [R_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z)^* \right. \\
&\quad \left. \times S_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z) \cdot R_{r0,m}(x, y, z_m)] \right\} dt
\end{aligned} \tag{2.44}$$

ここで、 $R_{r0,m}$ を次式の通り表現する。

$$\begin{aligned}
R_{r0,m} &= A \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos\phi \sin\theta \cdot x + \sin\phi \cdot y + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot z_m \right) \right] \\
&= A \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos\phi \sin\theta \cdot (x + \Delta x) + \sin\phi \cdot (y + \Delta y) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot (z_m + \Delta z) \right] \right\} \\
&\quad \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos\phi \sin\theta \cdot \Delta x \right) \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin\phi \cdot \Delta y \right) \\
&\quad \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot \Delta z \right)
\end{aligned} \tag{2.45}$$

式(2.45)を式(2.44)に代入することで、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
P_{CAM} &= j \frac{2\pi cL}{\lambda N} \cdot \frac{1}{t_r} \sum_{m=1}^N \int_0^{t_r} \left\{ \mathcal{F} \left[R_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z)^* \right. \right. \\
&\quad \times S_{w,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z) \cdot R_{r0,m}(x + \Delta x, y + \Delta y, z_m + \Delta z) \\
&\quad \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cos\phi \sin\theta \cdot \Delta x \right) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin\phi \cdot \Delta y \right) \\
&\quad \left. \left. \times \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi} \cdot \Delta z \right) \right] \right\} dt
\end{aligned} \tag{2.46}$$

次式で表されるフーリエ変換のシフト定理を適用する。

$$\mathcal{F}[f(x + \Delta x, y + \Delta y)] = \mathcal{F}[f(x, y)] \cdot \exp(j2\pi k_x \Delta x) \cdot \exp(j2\pi k_y \Delta y) \tag{2.47}$$

平面波展開法より、距離 z における複素振幅は次式で表される。

$$\begin{aligned}
f(x, y, z) &= \iint_{-\infty}^{\infty} A(k_x, k_y; 0) \exp(j2\pi k_z z) \exp[j2\pi(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \\
&= \mathcal{F}^{-1}[A(k_x, k_y; 0) \exp(j2\pi k_z z)]
\end{aligned} \tag{2.48}$$

式(2.48)を用いて、 $f(x, y, z + \Delta z)$ のフーリエ変換は次式の通り変換できる。

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}[f(x, y, z + \Delta z)] &= \mathcal{F} \left[\mathcal{F}^{-1}[A(k_x, k_y; 0) \exp(j2\pi k_z (z + \Delta z))] \right] \\
&= A(k_x, k_y; 0) \exp(j2\pi k_z (z + \Delta z)) \\
&= A(k_x, k_y; 0) \exp(j2\pi k_z z) \exp(j2\pi k_z \Delta z) \\
&= A(k_x, k_y; z) \exp(j2\pi k_z \Delta z) \\
&= \mathcal{F}[f(x, y, z)] \exp(j2\pi k_z \Delta z)
\end{aligned} \tag{2.49}$$

振動が無い状態でのカメラ上の回折光 $P_{CAM,0}$ を次式で表す。

$$P_{CAM,0} = j \frac{2\pi cL}{\lambda N} \sum_{m=1}^N \mathcal{F}[R_{w0,m}^* \cdot S_{w0,m} \cdot R_{r0,m}]. \tag{2.50}$$

ディスクのシフト方向の振動を表す重み係数を次式で表す。

$$g_{wf} = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} \exp \left[j2\pi \left(k_x - \frac{\cos\phi \sin\theta}{\lambda} \right) \cdot \Delta x \right] \cdot \exp \left[j2\pi \left(k_y - \frac{\sin\phi}{\lambda} \right) \cdot \Delta y \right] \cdot \exp \left[j2\pi \left(k_z - \frac{\sqrt{n^2 - \cos^2\phi \sin^2\theta - \sin^2\phi}}{\lambda} \right) \cdot \Delta z \right] dt \quad (2.51)$$

以上の関係養鯉, カメラ上の回折光は振動が無い状態の回折光に重み係数を乗算することにより, 式(2.52)の通り導出できる。

$$P_{CAM} = P_{CAM,0} \cdot g_{wf} \quad (2.52)$$

2.7 第2章の結論

本章では角度多重方式ホログラフィックメモリのシステムパラメータを最適化するためのモデルを構築した。まず, 記録密度, 転送速度, M/#消費とシステムパラメータとの関係を解析的に導出した。また, 記録品質の指標となる SNR について, シミュレータを構築して算出する環境を構築した。また, 参照光の角度方向の振動とディスクのシフト方向の振動の影響を評価するためのモデルを構築した。

3 ノイズ低減技術

3.1 ピクセル間クロストークキャンセル

3.1.1 はじめに

ピクセル間クロストークとページ間クロストークを低減できれば、SNR が向上し、高密度化が可能であると考えられる。そこで、本節ではピクセル間クロストーク低減方法について検討する。

ポリトピックフィルタは隣接ブックからのクロストークを除去することが可能であり、フィルタサイズを小さくするとプログラムサイズが小さくなりブック数を増加できる^[21]。従来のシステムでは 1.1 から 1.3 のフィルタサイズが用いられている^[7]。さらに小さなフィルタサイズはピクセル間クロストークが過大となるため、適用されていない。

本節では、信号品質を保ちながらさらにフィルタサイズを縮小可能なピクセル間クロストーク低減技術を提案する。シミュレーションによってピクセル間クロストークを解析し、解析した結果からピクセル間クロストーク低減技術を提案し検証する。最後にフィルタサイズと光量の関係、ノイズトレランス、位相パターンについて考察する。

3.1.2 クロストーク解析

様々な On ピクセルと Off ピクセルの組合せにおけるピクセル間クロストークを解析した。図 3.1 にピクセルの組合せによる光量の変化をシミュレーションした結果を示す。図中の”1”は On ピクセル, ”0”は Off ピクセル, I は中央のピクセルの光量を表す。フィルタサイズは $\sqrt{1.5}$ とした。中央のピクセルはいずれも On ピクセルであるが、周囲のピクセルの配置により、光量が増減することが分かる。

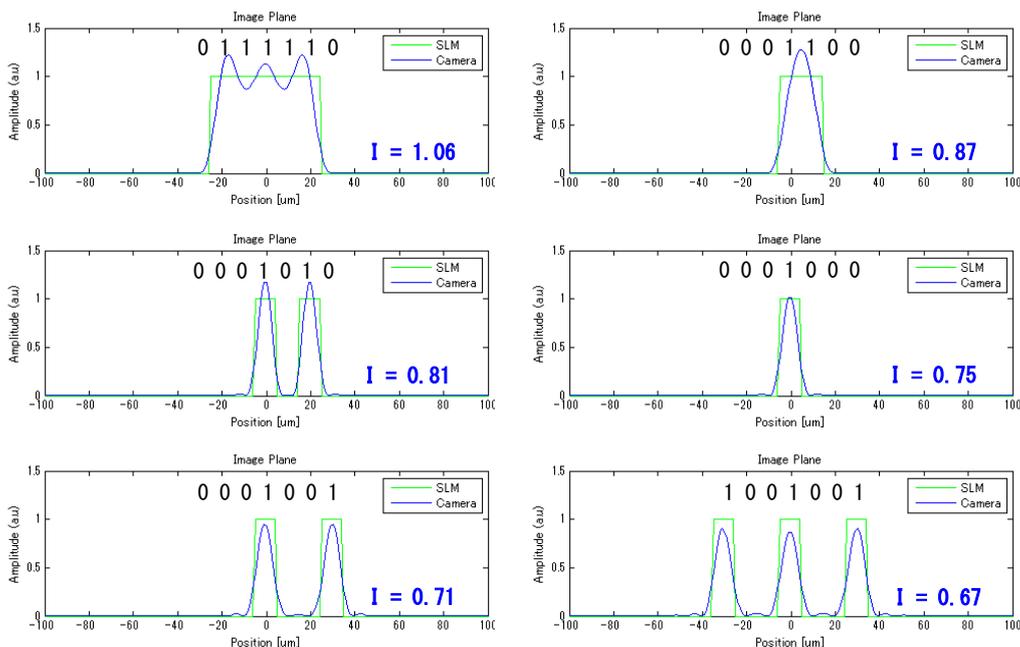


図 3.1 ピクセルの組合せによる光量の変化

図 3.2 にピクセルの組合せ毎の中央ピクセルの光量変化のフィルタサイズ依存を示す。隣接ピクセルが On ピクセルである(a)(b)では、光量が大きく、フィルタサイズ依存が小さいが、隣接ピクセルが Off ピクセルである(c)から(f)では、光量がフィルタサイズの縮小とともに変化する。また、フィルタサイズが 1 の近傍で(c)から(f)は光量が揃う。これは、フィルタサイズが 1 の場合、ピクセル応答である sinc 関数の周期がピクセルピッチと一致し、光量が 0 となる null 点が隣接ピクセルの中央に当たるようになるためである。したがって、フィルタサイズ 1 付近で隣接ピクセルが On ピクセルの場合と Off ピクセルの場合とで光量を揃えられれば、光量のばらつきを低減でき、SNR が改善すると考えた。

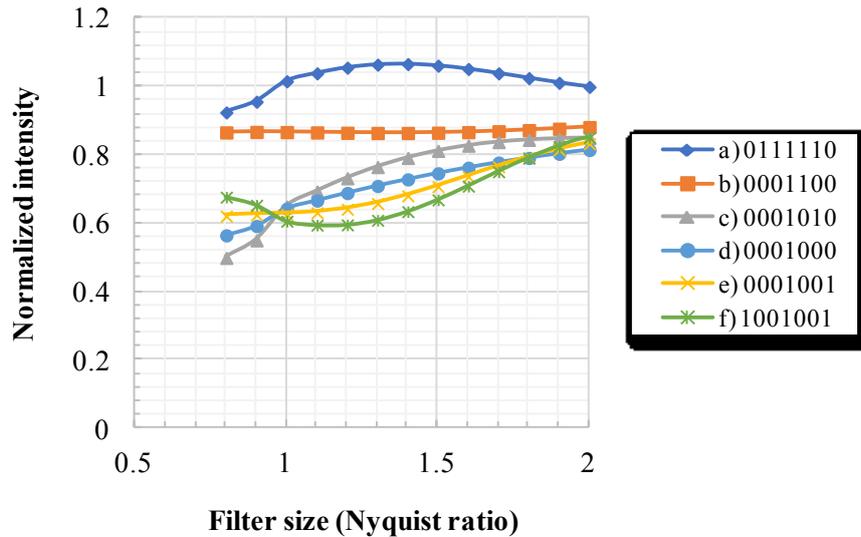


図 3.2 ピクセルの組合せ毎の中央ピクセルの光量変化のフィルタサイズ依存

ここで、図 3.3 に示す通り、隣接ピクセルがある場合のピクセルの光量について考える。第 1 のピクセルの振幅を E_{s1} 、第 2 のピクセルの振幅を E_{s2} 、2 ピクセルの位相差を ϕ_s とすると、2 ピクセル間で干渉が発生し、光量 I は、式(3.1)で表される。

$$I = (E_{s1} + E_{s2})(E_{s1} + E_{s2})^* = |E_{s1}|^2 + |E_{s2}|^2 + 2E_{s1}E_{s2}\cos\phi_s \quad (3.1)$$

第一のピクセルに着目した場合、クロストークとして式(3.1)の右辺第 2 項と第 3 項の影響を受ける。第 3 項はピクセル間の干渉に起因するものであるため、干渉項と呼ぶこととする。例えば、 $E_{s1} = 1$ 、 $E_{s2} = 0.1$ 、 $\phi_s = 0$ とした場合、第 2 項は 0.01、第 3 項は 0.2 と干渉項の影響の方が大きいことが分かる。隣接ピクセルに対しては干渉項の影響が大きく、ピクセル間で光量が増幅される。したがって、隣接ピクセル間の位相差を $\pi/2$ として干渉項の影響を無くし、隣接ピクセルが On ピクセルの場合でも、光量の増加を抑制する着想を得た。

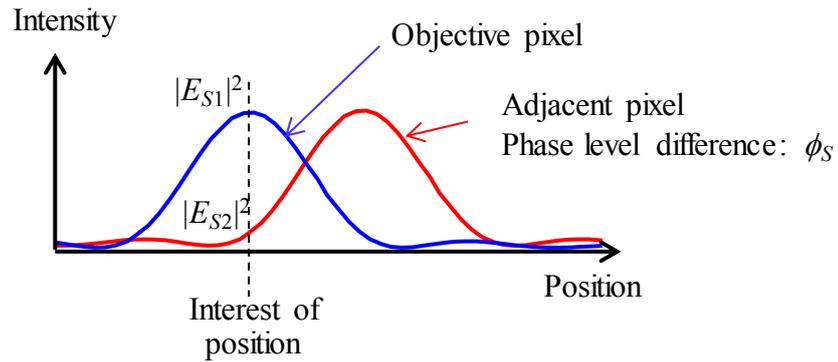


図 3.3 隣接ピクセルがある場合のピクセルの光量

3.1.3 クロストークキャンセル方法

前節でピクセル間クロストークを解析した結果、以下のピクセル間クロストークキャンセル方法を考案した。

- フィルタサイズを 1 に近づけ 2 ピクセル以上離れたピクセルの影響を抑制する
- 隣接ピクセル間で位相差 $\pi/2$ を付加し隣接ピクセルの干渉項の影響を低減する

隣接ピクセル間でクロストークをキャンセルするため図 3.4 に示す通り、位相差が $\pi/2$ となるチェッカーパターンの位相を適用する。本技術は SLM に位相パターンを形成する、もしくは貼り付けることによって実現できる。また、4f 系のリレーレンズを用いて位相パターンを像面と等価な位置に配置することによっても実現できる。一枚の位相パターンを信号光光路に配置するだけで、その他の光学系や信号処理の修正は不要である。さらに本方式は角度多重方式に限らず、例えばコアキシャル方式^{[13][14]}のようにページデータを有する方式であれば適用可能である。

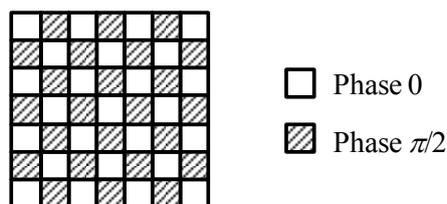


図 3.4 ピクセル間クロストークキャンセルのための位相パターン

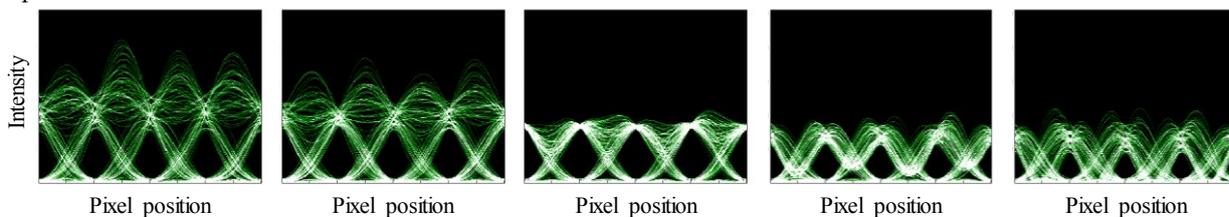
ピクセル間クロストークキャンセルの効果を検証するため、フィルタサイズとSNRとの関係を位相差を変えてシミュレーションした。表 3.1 にシミュレーション条件を示す。フィルタサイズはナイキストサイズに対する面積比率で示している。

表 3.1 ピクセル間クロストークキャンセルの効果検証のための光学パラメータ

| Item | Value |
|--------------------------------|-------------|
| Calculation data size | 1024 × 1024 |
| Oversampling of SLM pixel | 100 |
| SLM pixel pitch | 10 μm |
| Wavelength | 405 nm |
| Focal length of objective lens | 10 mm |
| Filter size | 1.0 |
| SLM pixel number | 100 × 100 |
| White rate | 0.50 |

図 3.5 にアイパターンとヒストグラムを示す。位相差が $\pi/2$ のときに最もピクセル応答のばらつきが小さくなり、アイパターンが明瞭となる。これは、式(3.1)において干渉項の影響が消去されるためである。位相差が 0 のときはピクセルの境界部分での強度が増大し、On ピクセルのばらつきが最大となる。これは、式(3.1)において干渉項の影響が最大となるためである。位相差が π のときはピクセル境界の強度が減少し、ヒストグラム上で On ピクセルの分布が Off ピクセルの分布と衝突している。これは、式(3.1)において干渉項の影響が負の方向で最大となるためである。

Eye pattern



Histogram

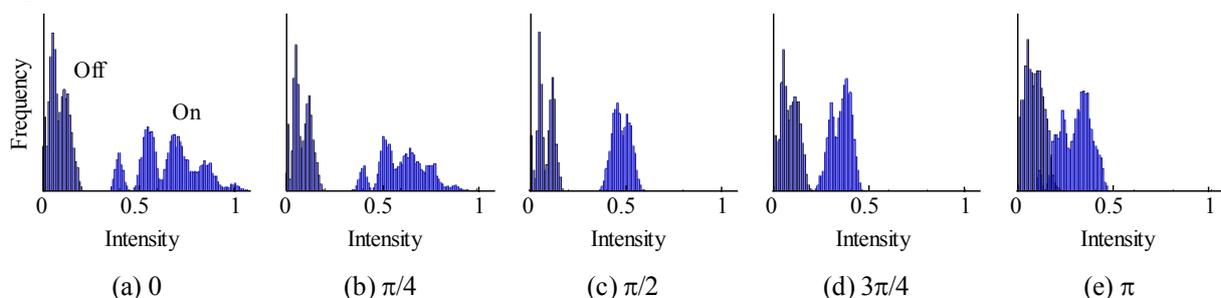


図 3.5 ピクセル間クロストークキャンセルの位相差変化時のアイパターンとヒストグラム

図 3.6 に位相差を 0 から π まで $\pi/4$ 間隔で変化させて場合の、フィルタサイズに対する SNR を示す。図より、位相差を $\pi/2$ としたときに SNR が大きく改善することが分かる。フィルタサイズ 1.05 以上ではフィルタサイズが小さいほど SNR の改善効果大きい。これよりもフィルタサイズが小さくなると、SNR は急激に低下するため、フィルタサイズを 1.05 に決定した。SNR の改善効果は 6.5dB となった。

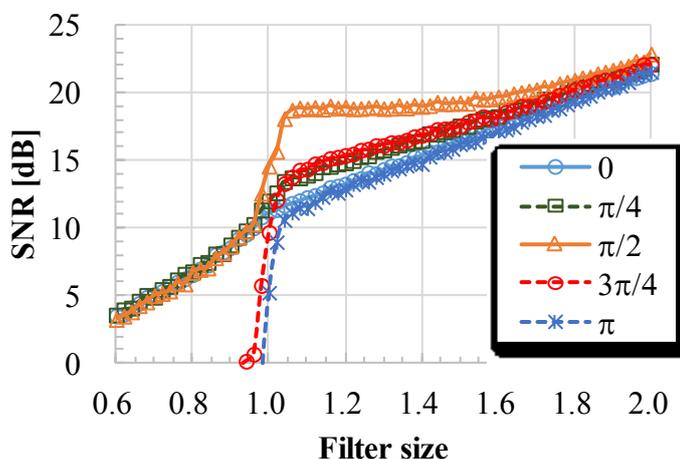


図 3.6 ピクセル間クロストークキャンセルの位相差変化時のフィルタサイズと SNR の関係

3.1.4 考察

フィルタサイズと強度の関係

図 3.7 に付加した位相差とフィルタ内の強度の関係を示す。強度は位相差が π に近づくほど減少する。したがって、位相差が付加されると、信号レベルは減少することが分かる。これは式(3.1)において、位相差が π で最も光量が低下することと一致する。しかしながら、光学系全体では光量は保たれるため、どこで光量が減少しているかを調査した。

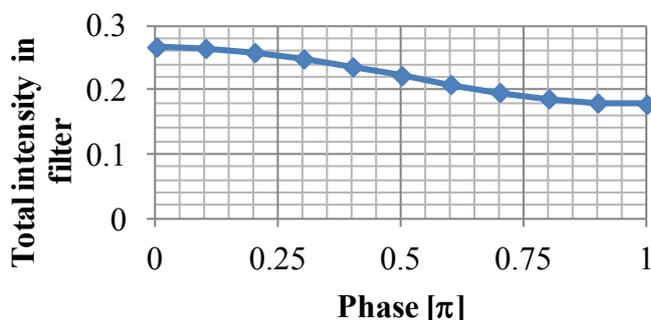


図 3.7 位相差とフィルタ内の光量の関係

図 3.8 に位相差に応じたフーリエ面における強度分布の様子を示す。図中赤色の枠はナイキストサイズ、緑色の枠はナイキストサイズに対して面積比で 2 倍の大きさを示す。位相差が付加されていない(a)ではナイキスト開口

の中心に強度が集中しているが、位相差が付加されるとナイキスト開口の4隅に強度が集中している部分が現れ、 π に近づくほど4隅の強度が大きくなる。したがって、位相差付加によって減少した光量はフィルタによって遮光されていることが分かる。また、フィルタサイズが1よりも小さくなった場合に急激にSNRが劣化する理由は、4隅の信号が完全に遮光されてしまい、信号レベルが急激に低下するためであることが分かる。

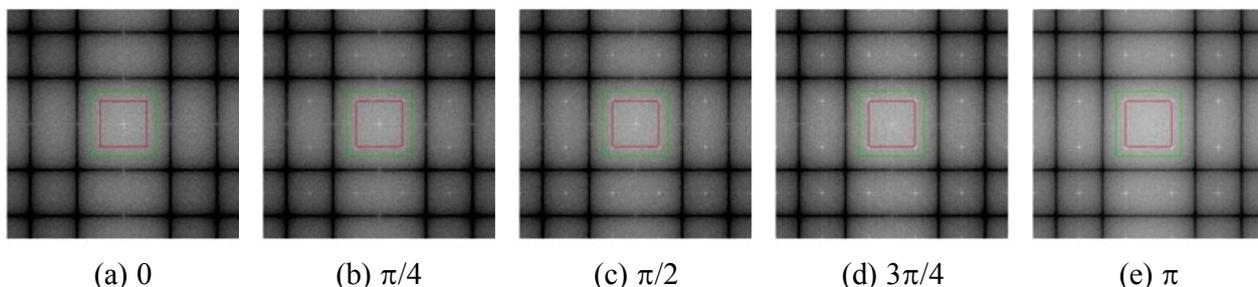


図 3.8 位相差に応じたフーリエ面における強度分布

ノイズトレランス

実際の再生においては、媒体ノイズやカメラノイズ等を考慮する必要がある。図 3.9 に媒体ノイズを想定し、ホワイトガウシアンノイズを印加した場合のSNRを示す。ここで、第 2.6.2 項で説明した固有ノイズの考え方にに基づき媒体ノイズ印加時の正規化ノイズから媒体ノイズを印加しない場合のノイズを式(4.4)に代入することで媒体ノイズを算出している。

図より媒体ノイズが小さい場合にはピクセル間クロストークキャンセルの改善効果が大きいですが、媒体ノイズが大きい場合には改善効果が得られなくなることが分かる。これは前項で説明したようにピクセル間クロストークキャンセルを適用すると信号成分は減少し、ノイズの増加に対して効果が小さくなるためと考えられる。したがって、実際のシステムにおいてはピクセル間クロストークキャンセルの効果を出すために低ノイズな媒体を利用する必要がある。

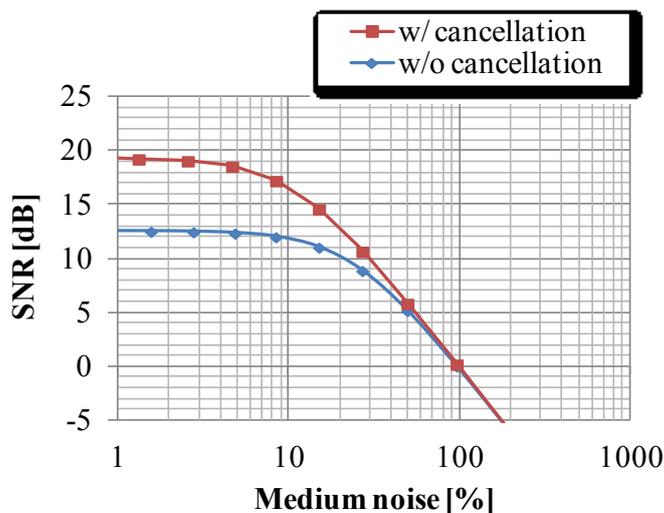


図 3.9 媒体ノイズと SNR の関係

位相パターンの検討

チェッカーボード状の位相パターン以外にさらに SNR を改善可能な可能性がないか調査した。図 3.10 に試行した位相パターンと、SNR、フーリエ面における強度分布を示す。図中の橙色の枠はフィルタサイズを示す。(c)から(f)は $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 位相を用いて、隣接ピクセル間で常に $\pi/2$ となるように位相を配置した。像面における空間的な位相の周波数を低減することで、フーリエ面における強度分布を中央に近づけてフィルタを通過する光量を増加させることを期待したが、元々提案している(b)よりも SNR が改善する位相パターンはなかった。(c)から(f)の位相パターンはいずれもフーリエ面中央の直流成分が減少しているため、信号成分が低下し、SNR が改善しなかったと考えられる。

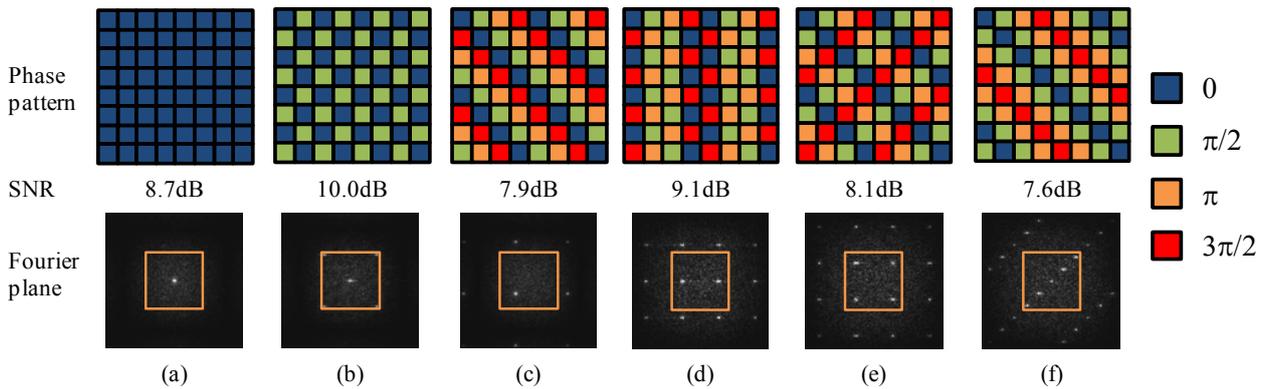


図 3.10 試行した位相パターンと、SNR、フーリエ面における強度分布

他の高密度化方式との親和性

高記録密度を実現するために偏光ホログラフィを用いたホログラフィックメモリが研究されてきている^{[25][26][27][28]}。偏光の状態を用いて多値記録をすること^[26]や直交する直線偏光を用いた多重記録^{[27][28]}をすることが可能である。直線偏光を用いた多重記録では 2 つの直交する偏光の間で干渉は発生しないため、本研究のピクセル間クロストークキャンセルを適用することが可能と考えられる。

位相多値を用いることで高記録密度を実現することも可能である^{[29][30][31]}。例えば $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ を用いて 4 値を記録し、局部発振光と回折光を干渉させて再生する方式が研究されている^{[30][31]}。この場合、変調自体に位相差を利用しているため、位相差を用いる本研究のピクセル間クロストークキャンセルの適用は困難と考えられる。

3.2 ページ間クロストーク低減

3.2.1 はじめに

記録密度を向上させるために多重数を増加させると、ページ間隔が狭まりページ間クロストークが増加する。角度選択性は信号光と参照光との角度に依存するため、ページ間隔を固定値にするとページ間クロストークはペー

ジ毎に変化する。このため、参照光角度に応じてページ間隔を適応的に変化させることによりページ間クロストークを均一化する方法が研究されている^{[32][33]}。また、ページデータを2つの領域に分割し、それぞれの領域の角度選択性に応じてページ間隔を制御することで高密度化する研究もある^[34]。しかしながら、従来ページ間クロストークそのものを低減する研究については例がない。

本節では、信号品質を保ちながらさらにページの角度間隔を狭めることが可能なページ間クロストーク低減技術を提案する。ページ間クロストークについて理論的な解析を行い、解析した結果から隣接ページ間で位相差を付加することによりページ間クロストークを制御する2つの方式を提案する。1つは隣接ページ間でページ全体に $\pi/2$ の位相差を付加することによりクロストークをキャンセルする方式であり、もう一方は隣接ページ間で所定領域に π の位相差を付加することにより信号を増幅する方式である。シミュレーションと実験によりノイズ低減効果を検証し、高転送速度を実現する上で課題となる高速な位相制御について検討する。

3.2.2 クロストーク解析

回折光量 I は、式(3.2)により表すことができる。

$$I \propto \text{sinc}^2 \left(\frac{\pi n L}{\lambda} \cdot \frac{\sin \theta_{RS}'}{\cos \theta_S'} \cdot \Delta \theta_R' \right) \quad (3.2)$$

ここで、 n は記録材料の屈折率、 L は記録層の厚み、 λ は波長、 θ_{RS}' は信号光と参照光が成す角度、 θ_S' はディスクの法線に対する信号光の角度、 $\Delta \theta_R'$ は記録時に対する再生時の角度ずれである。なお、式(3.2)における角度はディスク内における角度である。

図 3.11 に式(3.2)から導かれる角度選択性を模式図で示す。回折光量は記録角度から振動しながら徐々に低下していく。極小点となる角度を Null と呼び、記録角度を中心として、順に 1st null, 2nd null と呼ぶ。1st null よりも内側の領域の回折光の位相を基準として、1st null と 2nd null の間では位相差 π となり、以降は Null 毎に 0 と π の反転が繰り返される。これは回折光の振幅は sinc 関数で表され、Null 毎に振幅の正負が反転、すなわち、位相が反転するためである。

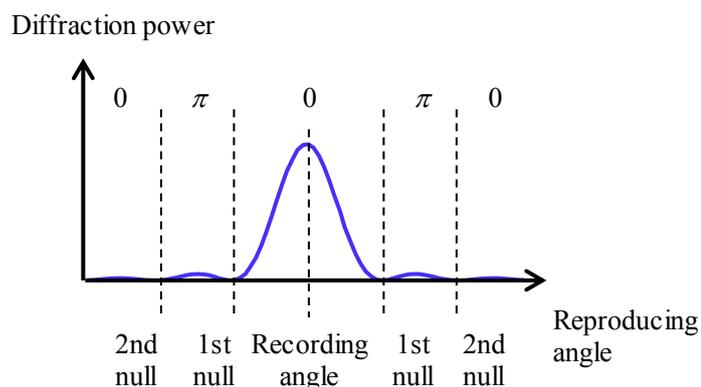
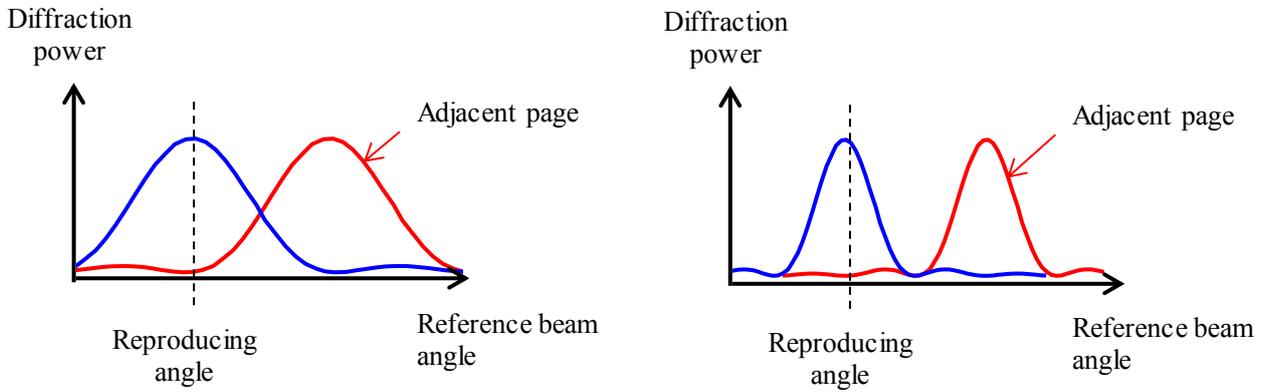


図 3.11 角度選択性

また、式(3.2)より、信号光と参照光の成す角度 θ_{RS}' に応じて角度選択性が変化することが分かる。 θ_{RS}' が 90 度以下の範囲では、 $\sin \theta_{RS}'$ は単調増加であるから、 θ_{RS}' が大きいほど角度選択性が高くなる。ページデータ内にお

いて、ピクセル毎に信号光と参照光の成す角度が異なるため、隣接ページの角度選択性は変化する。図 3.12 に角度選択性の違いを示す。(a)は信号光と参照光の成す角度が小さい場合の例で隣接ページのクロストークが 1st null となる場合、(b)は信号光と参照光の成す角度が大きい場合の例で隣接ページのクロストークが 2st null となる場合である。このようにページ内では信号光の角度に応じてクロストーク量が変化する。



(a) Angle between signal and reference beam is narrow (b) Angle between signal and reference beam is wide

図 3.12 角度選択性の違い

図 3.13 にクロストークの影響を模式図で示す。再生ページの再生角度における回折光の振幅を E_{P1} 、隣接ページの再生角度における回折光の振幅を E_{P2} 、再生ページと隣接ページの位相差を ϕ_P とする。

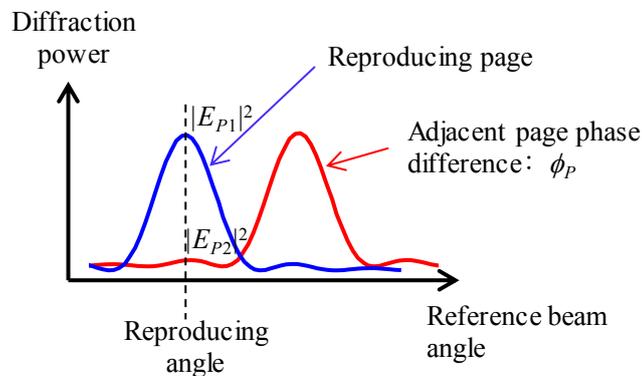


図 3.13 隣接ページのクロストークの影響

回折光量 I は式(3.3)で表すことができる。

$$I = (E_{P1} + E_{P2})(E_{P1} + E_{P2})^* = |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 + 2|E_{P1}||E_{P2}|\cos\phi_P \quad (3.3)$$

式(3.3)の第 1 項は信号成分、第 2 項はノイズ成分である。第 3 項は干渉の作用で発生する光量であり制御しなければノイズとなる。一例として、 $E_{P1} = 1$ 、 $E_{P2} = 0.1$ 、 $\phi_P = 0$ とした場合、第 1 項が 1 であるのに対して、第 2 項は 0.01 と十分小さくなるが、第 3 項は 0.2 と第 2 項よりも 20 倍大きい光量となり影響が大きいことが分かる。

隣接ページの位相差 ϕ_P は隣接ページの Null 毎の位相反転 ϕ_0 と記録時にページ間で与える位相差 ϕ_C を用いて $\phi_P = \phi_0 + \phi_C$ と表され、 ϕ_0 は信号光と参照光のなす角度に応じて 0 または π となる。本研究では ϕ_C を制御すること

によりページ間クロストークを低減する2つの方式を検討した。1つ目は隣接ページ間でページ全体に $\phi_c = \pi/2$ の位相差を付加することによりクロストークをキャンセルする方式であり、もう一方は隣接ページ間で所定領域に 1st null から 2nd null の領域に $\phi_c = \pi$ の位相差を付加することにより信号を増幅する方式である。

3.2.3 クロストークキャンセル方法

方式1 ページ間クロストークキャンセル

隣接ページ間でページ全体に $\phi_c = \pi/2$ の位相差を付加することによりクロストークをキャンセルする方式を検討した。 $\phi_c = \pi/2$ のとき、 ϕ_p は $\pi/2$ もしくは $3\pi/2$ であるから、常に式(3.3)の第3項が消去され、式(3.4)となる。

$$I = |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 \tag{3.4}$$

シミュレーションにより隣接ページ間の記録時の位相差 ϕ_c を変えながら、隣接ページ間隔 1.6 null で 5 ページの記録を行い、中央のページを再生し信号品質を評価した。なお、記録時のホログラム強度分布の偏りを緩和する目的で位相マスクを動かしながら記録を行うため、隣接ページ間では僅かに位相ずれが発生することも考慮して検討した。

図 3.14 にページ間クロストークキャンセルの効果を示す。横軸は隣接ページ間の位相差、縦軸は位相差が 0 の場合を基準としたノイズの低減量である。位相差 ϕ_c が $\pi/2$ のときに効果は最大となり 17.3%ノイズが低減することが分かる。

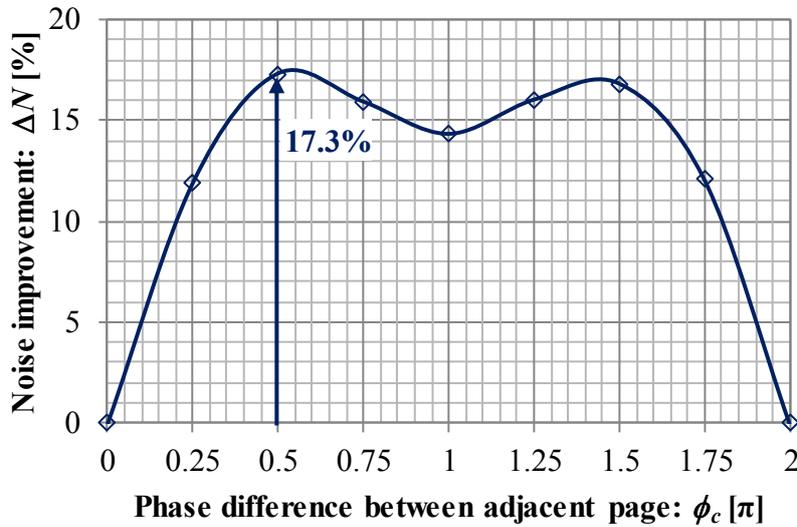


図 3.14 ページ間クロストークキャンセルによるノイズ低減量

方式2 クロストークによる信号増幅

隣接ページ間で所定領域に $\phi_c = \pi$ の位相差を付加することにより信号を増幅する方式を検討した。

隣接ページ間の位相差 ϕ_c が 0, $\pi/2$, π のときのページデータの品質を図 3.15 に示す。図中の 1st null と 2nd null は隣接ページの Null 角度を示す。ページデータ全体で比較すると位相差 ϕ_c が $\pi/2$ の場合が最良となっているが、領域を分けて比較すると必ずしも位相差 ϕ_c が $\pi/2$ の場合が最良とはなっていないことが分かる。1st null の

内側の領域で比較すると位相差 ϕ_c が0の場合が最良であり、1st nullと2nd nullの間の領域では位相差 ϕ_c が π の場合が最良となっている。2nd nullよりも外側の領域では品質の変化は小さい。また、Null角度ではクロストーク量が0となるため、位相差 ϕ_c を変えても品質の変化は無い。

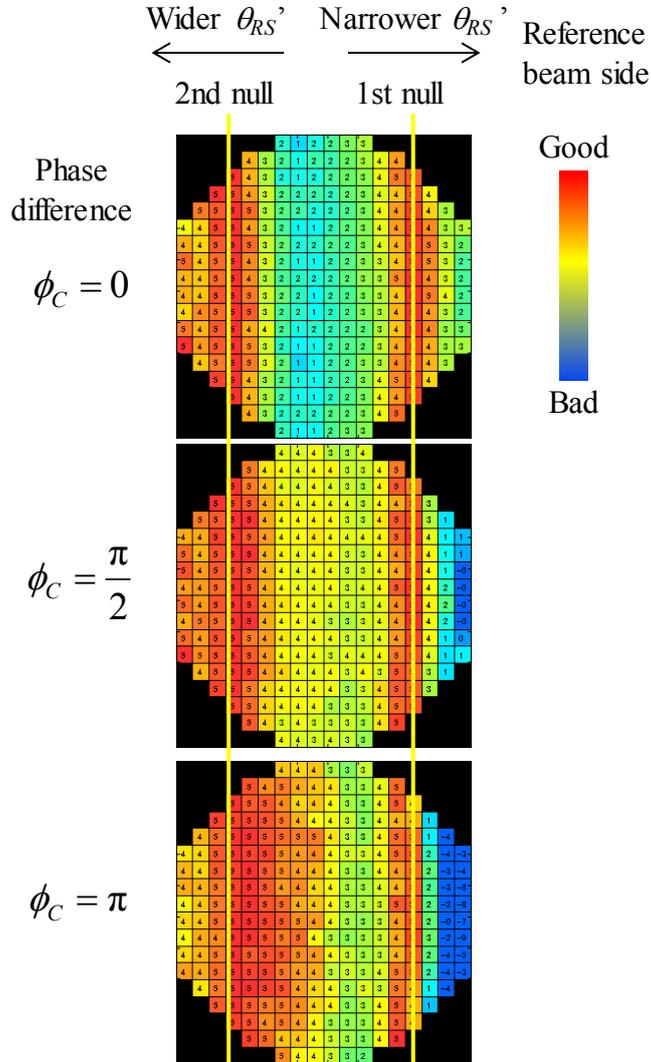


図 3.15 位相差によるページデータ内の信号品質の比較

1st null よりも内側の領域では $\phi_0=0$ があるため、式(3.3)は式(3.5)となる。

$$I = |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 + 2|E_{P1}||E_{P2}|\cos\phi_c \quad (3.5)$$

1st null と 2nd null の間の領域では $\phi_0=\pi$ であるため、式(3.3)は式(3.6)となる。

$$I = |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 - 2|E_{P1}||E_{P2}|\cos\phi_c \quad (3.6)$$

1st null よりも内側の領域では $\phi_c=0$, 1st null と 2nd null の間では $\phi_c=\pi$ で品質が最良となるということは、式(3.7)となる場合に品質が最良であることを意味している。

$$I = |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 + 2|E_{P1}||E_{P2}| \quad (3.7)$$

式(3.7)では第 3 項の影響が最大となっており、干渉の作用で E_{P1} を増幅する効果となっているため、品質が最

良となる。

以上から、1st nullと2nd nullの間の領域のみ、隣接ページ間で位相差 π を付加することにより信号を増幅しノイズを低減する方式を考案した。図 3.16 に隣接ページに付加する位相パターンとそのシミュレーション結果を示す。図 3.15 における最良の品質を組み合わせた結果となっており、位相制御をしない場合を基準としたノイズ低減効果は 22.7%となった。

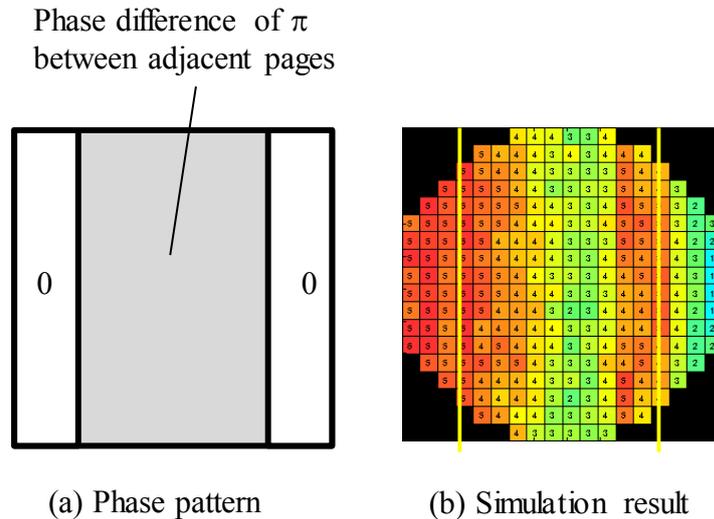


図 3.16 隣接ページ間の位相制御と制御を適用した場合の信号品質

3.2.4 実験結果

位相制御によるノイズ低減効果を実験的に検証するため、参照光光路に位相を制御可能なバリアブルリターダ(THORLABS 製, 型番: LCC1111U-A)を配置し、位相制御の有無による信号品質の違いを測定した。5 ページの記録を行い、中央ページの信号品質を比較し、ノイズ低減量を算出した。位相制御する場合は隣接ページ間の位相差を π とした。また、実験では 1.6 null で記録したが、実際の角度選択性は理論通りでは無いためシミュレーションは実測した角度選択性に合わせて 1.2 null の角度間隔とした。評価機のカメラのセンササイズの制限により、ページデータの一部を測定し評価した。

図 3.17 にページデータ内の信号光角度に対するノイズの低減量を示す。信号光角度はディスクに対する法線を 0 度として、参照光から遠ざかる方向を高角度側として定義した。シミュレーションでは平均 30.7%のノイズ低減効果であったのに対し、実験では 25.6%のノイズ低減効果となった。また、信号光角度の低角度から高角度側に向かってノイズ低減効果が大きい傾向が一致した。このことから位相付加によるページ間クロストークの低減効果の妥当性を確認した。

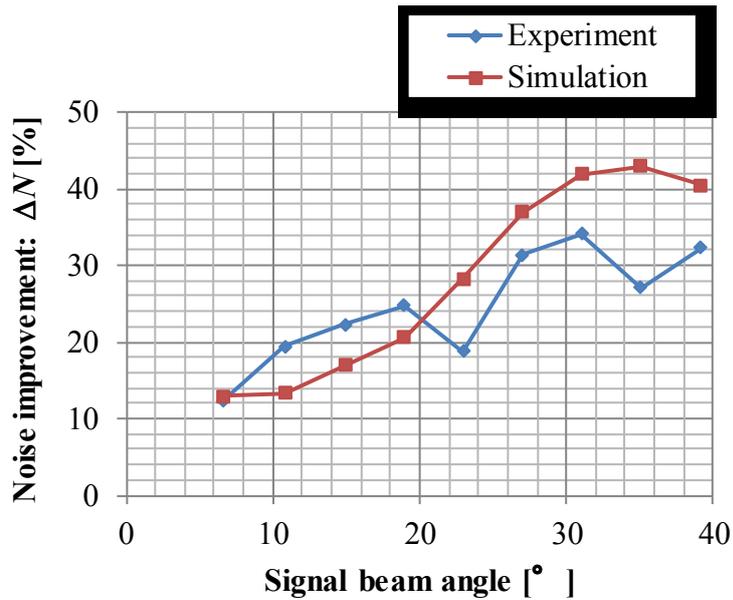


図 3.17 隣接ページ間の位相制御と制御を適用した場合の信号光角度に対するノイズ低減量

3.2.5 実現に向けた課題と対策

数 Gbps の転送速度を実現しようとした場合、ページ間の移動時間は 1 ms 以下となる。隣接ページ間で位相差を付加するためには、ページ間の移動中に高速に位相を変更するか、奇数ページを記録した後に位相付加して偶数ページを記録するかしなければならない。記録中は位相マスクを駆動しているため、ページ間ではほぼ同位相と見なせるが、複数ページを記録すると位相が変化してしまう。このため、後者の方法では意図した位相制御が困難である。そこで高速に位相変更が可能な素子の実現可能性について検討した。

図 3.18 に高速位相シフタの原理を示す。2 枚の液晶を配置し、電圧を印加すると互いに逆の方向に 45°進相軸が傾く構成とする。

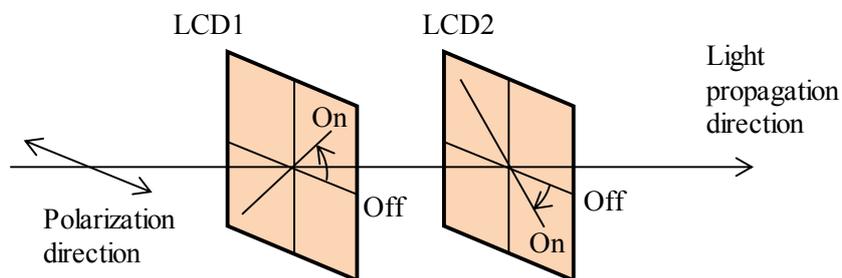


図 3.18 高速位相シフタの原理

液晶が HWP の場合、ジョーンズ行列 T_θ は式(3.8)で表すことができる。

$$T_\theta = i \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

2枚の液晶に電圧を印加した場合のジョーンズベクトルは式(3.9)となり、位相は変化しない。

$$T_{\theta=-\frac{\pi}{4}}T_{\theta=\frac{\pi}{4}}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ -i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

2枚の液晶に電圧を印加しない場合のジョーンズベクトルは式(3.10)となり、位相が π 変化する。

$$T_{\theta=0}T_{\theta=0}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

したがって、液晶が1/2波長板(HWP: Half Wave Plate)であれば、 π の位相付加ができることが分かる。同様に、液晶が1/4波長板(QWP: Quarter Wave Plate)であれば $\pi/2$ 位相付加ができる。液晶の材料として、高速な駆動が可能な強誘電性液晶を用いることにより、1 ms以下の高速な位相制御が実現できる^[35]。

3.3 振動の影響低減

3.3.1 はじめに

振動が発生すると、本来記録すべき干渉縞の位相に対して、異なる位相のホログラムが重畳されるため、結果としてホログラムの屈折率変調の振幅が低下して、回折光量が低下する。したがって、振動の影響を回避できれば、SNRの低下を抑制することができる。本節では、まず時間平均ホログラム^[53]の物理的な意味について考察し、振動の影響の評価方法を提案し、検証する。次に、振動の影響を回避するための手法について検討する。

3.3.2 影響解析手法

議論を容易にするため、式(2.39)をブラッグ方向の角度に着目して次式の通り記述する。

$$f_{wf} = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} \exp[jC\theta(t)] dt \quad (3.11)$$

ここで、 C は時間には依存しない定数とし、 $\Delta\theta$ は時間に依存するパラメータとして $\theta(t)$ としている。

式(3.11)は振動波形が位相項の時間平均として変換されることを意味している。すなわち、振動波形を時間軸で積算した振幅分布が重み係数 f_{wf} を決定していることを意味している。すなわち、特定の時刻における振幅が他の時刻における振幅と入れ替わっても影響が無いことになる。解析的に重み係数 f_{wf} を扱うために確率質量関数(PMF: Probability Mass Function)を用いる。図3.19に時間平均ホログラムの考え方をPMFを用いて解釈する様子を模式的に示す。 t を連続的な時刻、 k を離散的な時刻として、振動波形 $\theta(t)$ を離散化して θ_k として表す。時間軸での振動の影響は特定の時刻における振動振幅が他の時刻と入れ替わっても影響が無いため、離散化した振動波形の振幅を時間軸方向に積算したPMFが重み係数として意味を成すことが分かる。

$\theta(t)$: Incident angle
of reference beam

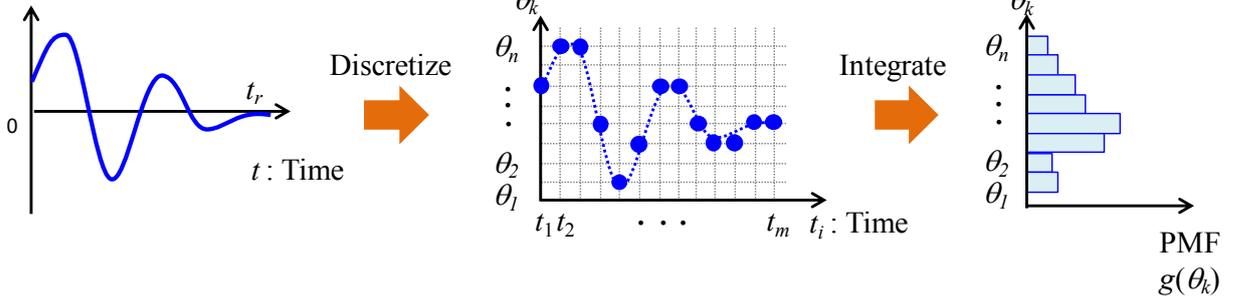


図 3.19 時間平均ホログラムの解釈

上記の解釈は数学的には以下の通り証明できる。 θ は $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ に離散化し、 t は $t_i (i = 1, 2, \dots, m)$ に離散化し、離散化の間隔は $\Delta t (= t_i - t_{i-1})$ とする。 θ の PMF は、次式の通り表現できる。

$$\begin{aligned} g(\theta_k) &= P(\theta = \theta_k) \\ &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{\theta(t_i) \theta_k} \end{aligned} \quad (3.12)$$

ここで δ はクロネッカーのデルタである。

$$\delta_{\theta(t_i) \theta_j} = \begin{cases} 1 & (\theta(t_i) = \theta_j) \\ 0 & (\theta(t_i) \neq \theta_j) \end{cases} \quad (3.13)$$

式(3.11)を離散化し、式(3.12)(3.13)を用いることで、次式を導出する。

$$\begin{aligned} f_{wf} &= \frac{1}{m\Delta t} \sum_{i=1}^m \exp[jC\theta(t_i)] \\ &= \frac{1}{m\Delta t} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \exp[jC\theta_k] \cdot \delta_{\theta(t_i) \theta_j} \\ &= \frac{1}{m\Delta t} \sum_{k=1}^n g(\theta_j) \cdot \exp[jC\theta_k] \end{aligned} \quad (3.14)$$

式(3.14)から重み係数 f_{wf} は PMF に位相項を乗算したものの和を全体の時間で除算したものとして表されていることが分かる。ここで、時間に依存する項目は消えており、振動波形の PMF がホログラムの記録再生過程に影響を与えることが分かる。

式(3.14)に基づいて振動の影響を評価する手法を考案した。評価の流れとしては、第一に、振動波形が単一周波数の正弦波の場合を想定し、振動の影響を指標化し、これと再生光量との関係を近次式で求め、第二に、任意の振動波形に対して振動の影響の指標を求めて、これを前記の近似式に代入して、再生光量を推定する。

参照光の角度方向の振動については、二乗和平方根(RMS: Root Mean Square)を PMF の指標とした。図 3.20 に参照光のブラッグ方向の角度方向の振動振幅の RMS と正規化した再生光の強度との関係をシミュレーションによって算出した結果を示す。ここで、波長 405nm, 記録層厚み 1.5mm, 対物レンズ焦点距離 12.4mm, 参照光の入射角度 35°, SLM のピクセルピッチ 8.0 μ m, ページデータサイズ 1056 \times 128 画素の条件で単一周波数の正弦波の振幅を変えることによってシミュレーションを行った。この結果より、正規化した再生光強度の近似値を I , 振動振幅の RMS を α_B , として、次式を得た。

$$I = 1 - 3.45 \times 10^{-3} \alpha_B^2 \quad (3.15)$$

これを用いて、任意の振動の影響を評価するには、振動振幅の RMS である α_B を算出し、式(3.15)に代入することで再生光強度を推定する。

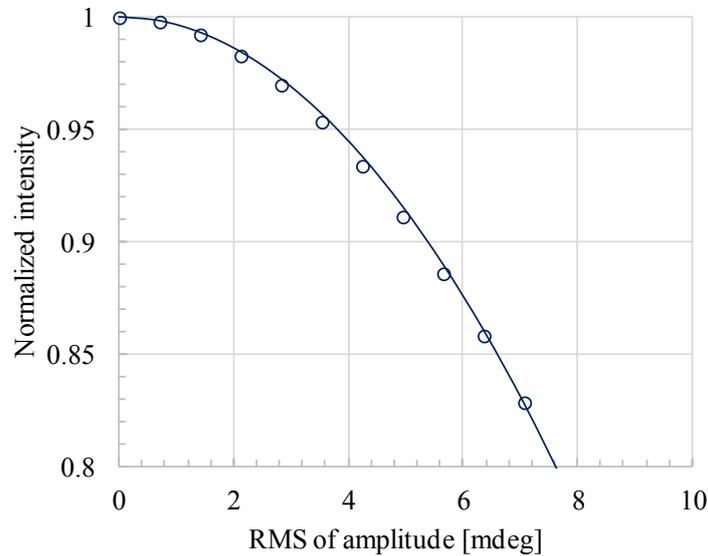


図 3.20 正弦波振動の振幅の RMS 値と正規化した再生光量との関係

上記手法は他の振動にも適用可能であり、ディスクのシフト方向に対しては RMS の代わりに標準偏差を用いる。角度多重方式のホログラムはブラッグ方向に選択性を持つが、シフト方向には選択性を持たないため、記録時と再生時の角度平均値の差は再生光量に影響するが、シフト量の平均値の差は影響しない。したがって、0 からの変位で計算する RMS は角度方向の振動の評価に適しており、平均値からの変位で計算する標準偏差はディスクのシフト方向の振動の評価に適している。

3.3.3 影響解析手法の検証

単一周波数ではない振動波形を用いた影響解析手法の検証を行った。参照光のブラッグ方向の角度について、前節と同じシミュレーション条件で記録時の振動の影響を評価した。図 3.21 に検証に用いた振動波形の例を示す。図 3.21(a)はランダム波形、図 3.21(b)は緩和振動波形、図 3.21(c)は 2 つの周波数を重畳した波形である。

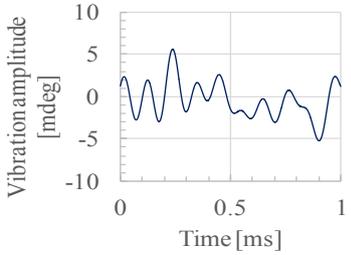
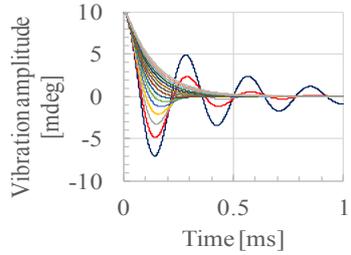
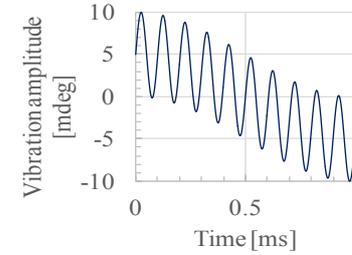
| (a) Random waveform | (b) Damped oscillatory waveform | (c) Composite of two simple harmonic waves |
|--|--|---|
| - Superposition of 100 random frequency (1Hz-10kHz), phase, amplitude - Total, 30 waveforms | - Damped oscillatory waveform of which damping ratio is changed Initial amplitude: 10 mdeg - Total, 15 waveforms | -Waveform 1: Frequency, 10 kHz; Amplitude, 0.01°p-p; Phase, 0° - Waveform 2: Frequency, 0.5 k-2 kHz; Amplitude, 0.01°p-p; Phase, 0 – 135° - Total, 33 waveforms |
|  |  |  |

図 3.21 影響解析手法の検証に用いた振動波形の例

図 3.22 に振動の影響を加味したシミュレーションによって求めた正規化再生光強度と影響解析手法により推定した正規化再生光強度との比較を示す。影響解析手法で求める際には図 3.21 の(a), (b), (c)の波形の RMS を式 (3.15) に代入することで正規化再生光強度を求めた。影響解析手法で推定した値はシミュレーションによって求めた値と良く一致しており、相関係数は 0.999 であった。したがって、正規化再生光強度は振動波形の RMS で精度良く推定できることが分かった。

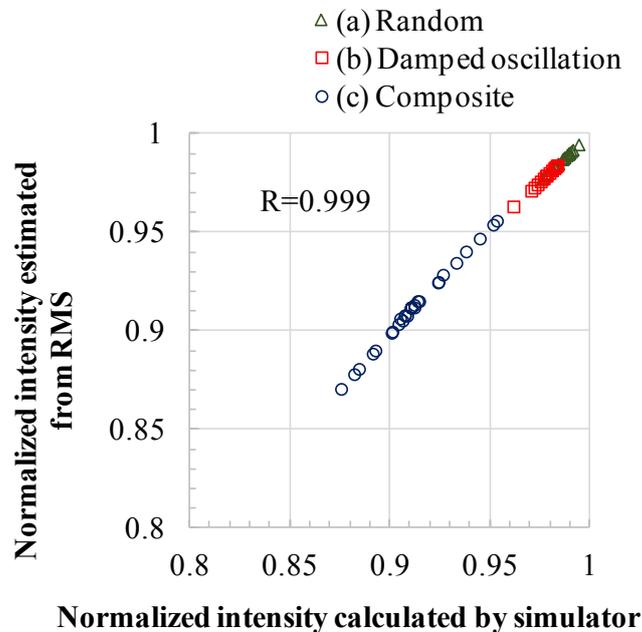


図 3.22 参照光のブラッグ方向の角度振動印加時の正規化再生光量のシミュレーションと推定値との相関

上記の影響解析手法は参照光の縮退方向についても適用が可能である。図 3.23 は参照光の角度方向の振動について振動波形の RMS に対する正規化再生光量を示す。再生光量は振動が無い場合の光量で正規化した。塗り潰されていない点は単一周波数の振動の結果、塗り潰された点はランダムな振動の結果を示しており、両者は良く一致している。これは、振動波形の特徴によらず、RMS を指標として振動の影響が評価できることを意味している。

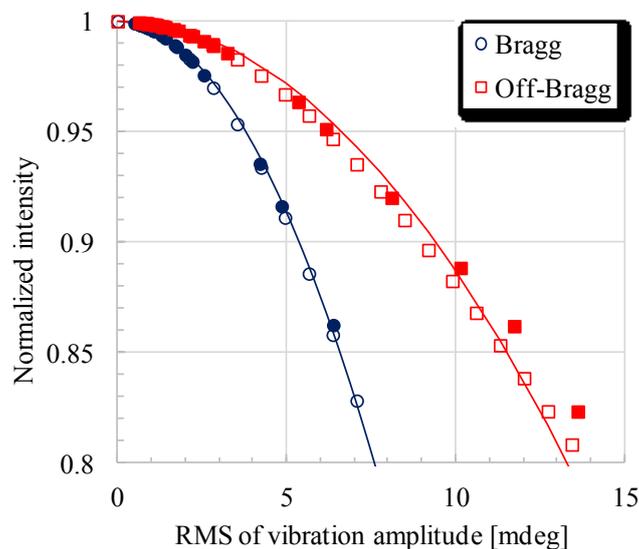


図 3.23 参照光の角度方向の振動波形の RMS と正規化再生光量の関係

図 3.24 にディスクのシフト方向の振動について、標準偏差に対する正規化再生光量を示す。塗り潰されていない点は単一周波数の振動の結果、塗り潰された点はランダムな振動の結果を示し、両者が良く一致していることから、参照光の角度方向の振動と同様に振動の影響が標準偏差を指標とすることで評価可能であることが分かる。

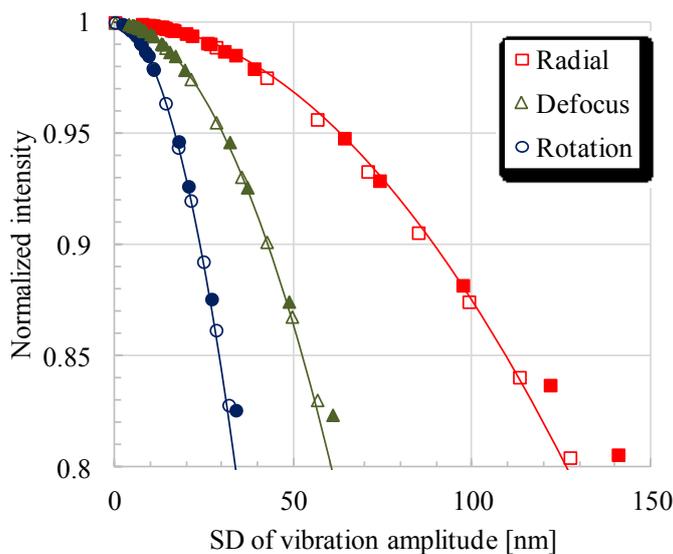


図 3.24 ディスクのシフト方向の振動波形の標準偏差と正規化再生光量の関係

図 3.25 に参照光のブラッグ方向と縮退法光，ディスクの半径方向，デフォーカス方向，回転の接線方向に振動を印加した場合のシミュレーションによって取得した正規化再生光量と，RMS もしくは標準偏差によって推定した正規化再生光量との関係を示す。参照光のブラッグ方向と縮退方向の角度方向の振動については RMS で推定し，ディスクの半径方向，デフォーカス方向，回転の接線方向の振動については標準偏差で推定した。全ての振動方向において，相関係数は 0.992 以上であり，RMS もしくは標準偏差により精度良く振動の影響を評価できることが分かる。

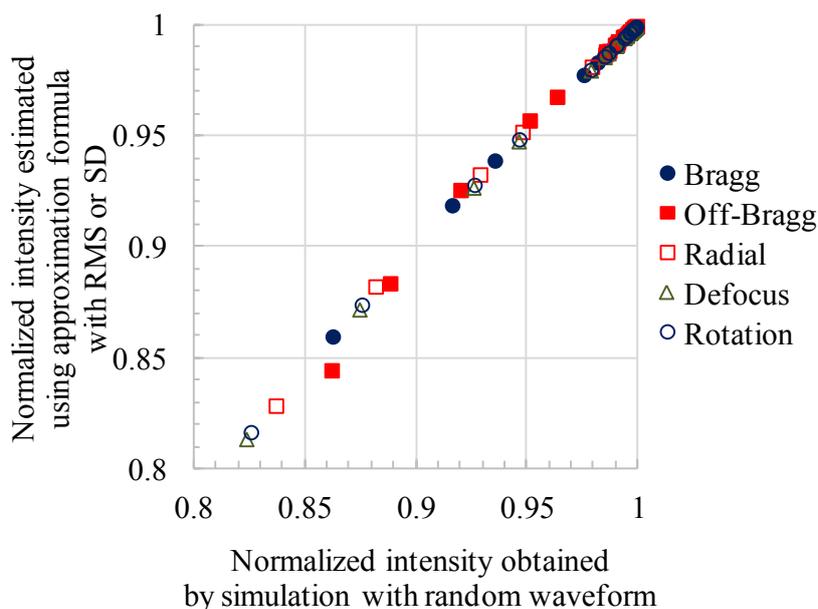


図 3.25 参照光角度とディスクシフトの角度振動印加時の正規化再生光量のシミュレーションと推定値との相関

振動波形の RMS もしくは標準偏差に対する正規化再生光量の低下の影響は振動の方向に依存する。図 3.23 からはブラッグ方向影響が縮退方向の影響よりも大きいことが分かる。これはブラッグ方向の選択性が縮退方向の選択性よりも大きいことによる。

図 3.26 に参照光のシフト方向の振動の標準偏差と正規化再生光量との関係を示す。図より参照光の半径方向の振動については影響がないことが分かる。また，デフォーカス方向の振動の影響は回転の接線方向の振動よりも影響が大きいことが分かる。半径方向の振動に対して影響がないのは，参照光の波面は半径方向のシフトに対して不変であることによる。デフォーカス方向と回転の接線方向の感度の違いについては，図 3.27 (a) に示すように参照光の入射角度が 35° の場合，参照光の軸はデフォーカス方向の軸に近い場合，回折格子の周期は回転の接線方向よりもデフォーカス方向の方が狭くなることによる。

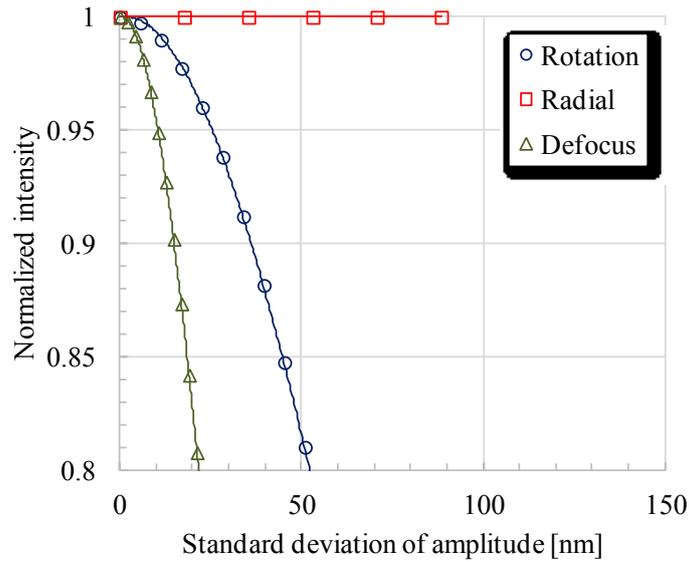


図 3.26 参照光のシフト方向の振動の標準偏差と正規化再生光量の関係

ディスクのシフト方向の振動については回転の接線方向の影響が最も大きい。これは、図 3.27 (b)に示すように回折格子の周期は回転の接線方向に対して最も狭くなることによる。

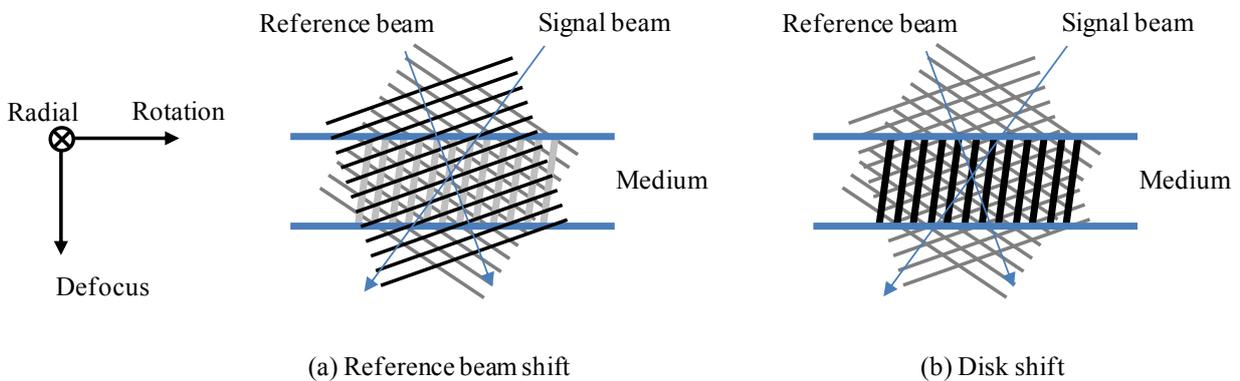


図 3.27 振動の影響の振動方向に対する差異

3.3.4 記録停止処理の効率化

開発した振動の影響解析手法を用いて、振動がある状況下でも記録転送速度を低下させないための処理を考案した。記録時に振動が発生した場合、信号品質を保証するために記録処理を停止する必要がある。ここまでの検討で振動波形の PMF もしくは標準偏差と信号品質に強い相関があることが明らかとなった。したがって、この相関を用いて記録停止処理を行うことを考えた。

図 3.28 に振動波形の標準偏差を用いて記録停止処理を行う例を示す。ここでは 3 種類の振動波形について検討した。振動波形(i)は周波数が高く振動期間が短い場合、(ii)は周波数が低く振動期間が長い場合、(iii)は周波数が高く振動期間が長い場合で、いずれも振動の振幅は同一である。振動の振幅に閾値を設けて記録停止

処理をする場合、いずれの振動波形に対しても記録を停止するかしないかの一律の処理しかできない。しかしながら、振動波形(i), (ii), (iii)の記録露光時間における標準偏差は 11.7 nm, 1.95 nm, 26.1 nm であり、ここから振動の影響解析手法を用いて推定した正規化再生光量はそれぞれ、97.54%, 99.97%, 88.02%となる。すなわち、振動波形(i), (ii)に対しては再生光量の低下は小さいため、記録を停止する必要はないが、(iii)に対しては、再生光量の低下が大きいため、記録を停止する必要がある。そこで、標準偏差を逐次計算し、所定の閾値を超えた場合に記録停止する処理を考えた。図 3.28 は記録露光時間の 1/4 の時間で標準偏差を逐次計算し、閾値を 35 nm に設定し、これを超えた場合に記録停止する処理の例である。振動波形(i), (ii)では記録を停止せず、振動波形(iii)に対してのみ記録を停止できていることが分かる。

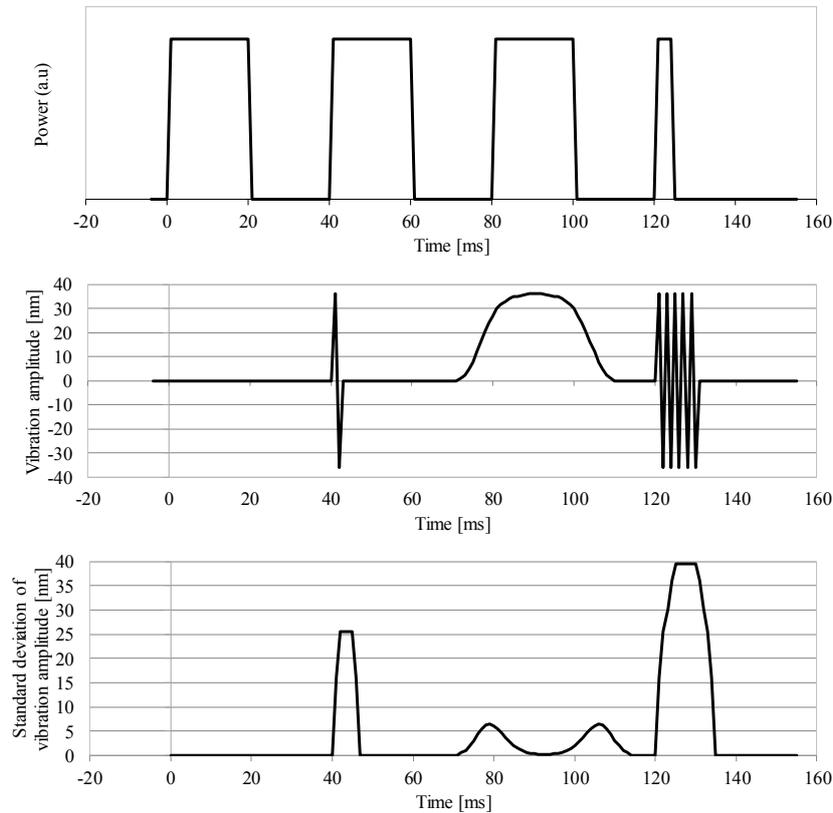


図 3.28 振動波形の標準偏差を用いて記録停止処理を行う例

3.3.5 考察

振動による正規化再生光量は RMS もしくは標準偏差(SD)を用いて、 C を定数として、 $1 - C^2(RMS)^2$ もしくは $1 - C^2(SD)^2$ で近似できることを示した。これは理論的には次のように説明可能である。正規化再生光量は重み係数の 2 乗に比例するため、

$$\begin{aligned}
 |f_w|^2 &\sim \frac{1}{t_r} \left| \int_0^{t_r} \exp(jC\theta(t)) dt \right|^2 \approx \frac{1}{t_r} \left| \int_0^{t_r} \left(1 + jC\theta(t) - \frac{C^2}{2}\theta(t)^2 \right) dt \right|^2 \\
 &= \left| 1 + jC\overline{\theta(t)} - \frac{C^2}{2}\overline{\theta(t)^2} \right|^2 \approx 1 - C^2 \left[\overline{\theta(t)^2} - \left(\overline{\theta(t)} \right)^2 \right] = 1 - C^2(SD)^2
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

ここで“ $\overline{\quad}$ ”は時間平均を表す。式(3.16)の導出はストレール比の導出^[55]と同一である。シミュレーション結果から

求めた図 3.20, 図 3.23, 図 3.24, 図 3.26 の正規化再生光量の低下の近似式は式(3.16)と一致している。

一つの評価指標で振動の影響を評価できることは複雑な光学機構を搭載するホログラフィックメモリシステムの効率的な開発に有効である。高転送速度を実現するためには、ディスク回転およびガルバノミラーによる参照角度の制御を高速かつ同期して行う必要があり、振動の影響を定量的に評価することが必要である。単一の周波数の影響のみ把握できれば、RMS もしくは標準偏差を用いて複雑な振動波形に対する影響を評価できるため、サーボ制御の設計と振動の影響評価を繰り返す必要がなくなる。

サーボ制御においては、記録停止は一般的には振動波形そのものを用いることが多かった。例えば、Kogure らは振動振幅をモニタし、所定の閾値を超えた場合に記録停止する処理を提案している^[51]。5.4 節で提案した記録停止処理では RMS もしくは標準偏差を用いることで不要な記録停止を発生させないため、高い転送速度を保つことが可能となる。

3.4 第 3 章の結論

本章ではまず、高い SNR を保ったままフィルタサイズを縮小し高密度化を実現可能なチェッカーボード状の位相パターンでピクセル間に $\pi/2$ の位相差を付加したピクセル間クロストークキャンセル技術を開発した。本手法は 1 枚の位相板を信号光光路に配置するだけで、他の光学系や信号処理への変更は不要であるため、容易に実現可能である。フィルタサイズが 1.05 でノイズが無い状態では 6.5dB の SNR 改善効果が得られた。モノキュラ光学系で実際のノイズを想定すると 0.85dB の SNR 改善効果となった。実験系を用いた本手法の検証が今後必要である。

次に、角度多重方式ホログラフィックメモリにおいて高密度化を実現するために重要なページ間クロストーク低減技術について検討した。隣接ページ間で位相差を付加することによりページ間クロストークを制御する 2 つの方式を考案した。一方は隣接ページ間でページ全体に $\pi/2$ の位相差を付加することによりクロストークをキャンセルする方式であり、もう一方は隣接ページ間で 1st null から 2nd null の領域に π の位相差を付加することにより信号を増幅する方式である。シミュレーションによるノイズ低減効果を比較した結果、前者は 17.3%、後者は 22.7%となった。また、実験により位相差付加によるノイズ低減効果の検証し、シミュレーションと実験で改善効果が同等の傾向であることを確認した。最後に実用上課題となる、高速な位相制御について検討し、2 枚の強誘電性液晶を用いた位相制御方式を提案した。ページ内で 1st null から 2nd null の領域にのみ位相差を付加する方式は、null となる位置がページ毎に変化すると制御が難しい点や、null となる位置で位相の変化が急峻であると回折が発生し、信号品質を劣化させる点など課題が多く、ページ全体で位相差 $\pi/2$ を付加する方式が実用的である。6 章でページ間クロストーク低減の高密度化に対する効果検証を行うが、ページ全体で位相差 $\pi/2$ を付加する方式を前提として検討する。

最後に、角度多重方式ホログラフィックメモリにおいて、振動の影響を評価する実用的な手法を開発した。まず、RMS もしくは標準偏差に対する正規化再生光量の 2 次近次式を用いて、任意の波形の正規化再生光量を推定する手法を提案した。次に、提案した手法では参照光の角度方向とディスクのシフト方向について単一周波数の振動の正規化再生光量への影響を一度評価し、近似式を取得すれば良く、シミュレーションによって取得した正規化再生光量と推定した正規化再生光量との相関係数は 0.992 以上であり、精度良く振動の影響を評価できることを示した。振動波形の RMS もしくは標準偏差に対する正規化再生光量の応答が 2 次近似で表現できる理由に

ついてストレール比の導出と同様に説明可能であることを示した。最後に、開発した振動の影響解析手法を用いて記録停止処理を効率的に行う手法を開発した。開発した手法では、振動波形のRMSもしくは標準偏差が一定の閾値を超えた場合に記録停止をすることにより、不要な記録停止がなくなることを示した。

4 最適化設計

4.1 記録密度最大化

本節ではシステムパラメータの最適化を行う。記録密度と転送速度を最適化の指標として設計する。最適化の手順は以下の3ステップとなる。

STEP 1: 初期パラメータの決定

STEP 2: 光学パラメータ最適化

STEP 3: クロストーク性ノイズ配分最適化

角度多重方式のホログラフィックメモリのシステムパラメータは多数あるため、設計の初期値を与え、そこから最適化することとした。初期値としては InPhase 社の試作ドライブのパラメータを推定し与えた。

次に、記録容量と転送速度に与える影響の大きい、波長、ピクセルピッチ、焦点距離、NA、記録層厚みのパラメータを変化させ、記録容量、転送速度、M/#消費、M/#利用効率に対する影響をシミュレーションし、パラメータを決定した。ここで、対物レンズのNAは0.85で固定し、信号光最内角を変化させることで、実効的なNAを変化させた。

最後に、ピクセル間クロストークとページ間クロストークの配分を信号品質が確保できる条件で最適化した。

初期パラメータの決定

表 4.1 に検討に用いた初期パラメータを示す。以降、各パラメータの根拠について述べるが、特に触れないパラメータについては、InPhase 社のドライブのパラメータとして明らかなものである^[7]。

表 4.1 初期パラメータ

| | Parameter | Specification |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| Laser | Laser power | 40 mW |
| | Wavelength | 405 nm |
| Object lens | Focal length | 12.4 mm |
| | NA | 0.85 |
| | θ_{signin} | 23.5° |
| | θ_{dead} | 10° |
| SLM | Pixel pitch | 10.67 μm |
| Camera | Dark noise | 21 e^- |
| | Conversion gain | 39.2 mV/ e^- |
| | Responsibility | 1270 V.m ² /W.s |
| Disk | Medium thickness | 1.5 mm |
| | Inner radius of disk | 26 mm |
| | Outer radius of disk | 63 mm |
| | Sensitivity | 0.5 cm/mJ |
| | Noise | 26.3% |
| Filter size | | 1.225 ($\sqrt{1.5}$) |
| Multiplexing number | | 320 |
| Code rate | | 37.1% |
| Exposure time | | 1.5 ms |
| Page transition time | | 1 ms |
| Book transition time | | 100 ms |

図 4.1 に信号光最内角の初期パラメータを示す。InPhase 試作ドライブの NA は 0.65, 参照光の走査角度は 24°, 信号光最内角と参照光最内角の差を 10° と仮定した。信号光最外角と参照光最外角が同一と仮定すると, モノキュラ光学系では NA0.85, 信号光最内角は 23.5° に相当する。

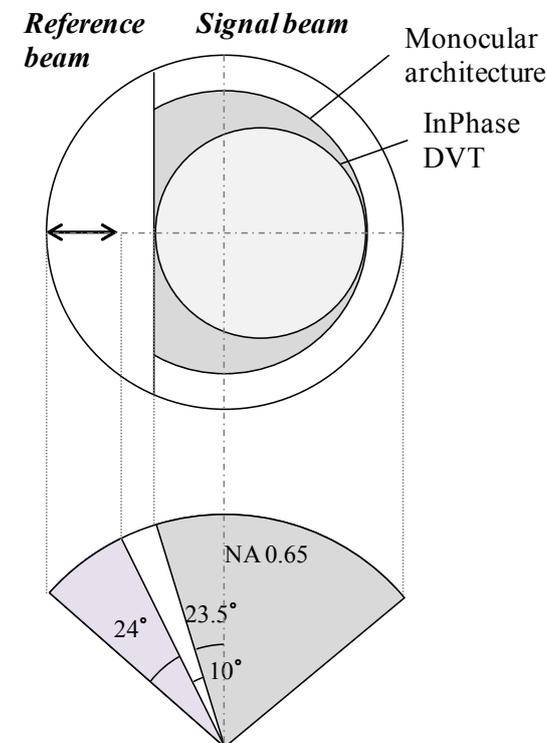


図 4.1 信号光最内角の初期パラメータ

符号化率について, InPhase 社の SLM は 1216 x 1216 画素, ユーザデータ 67512 byte であるから, ヘッダーや周囲の利用されないピクセルも含めた符号化率(変換効率)は 36.5%となる。

InPhase のメディア感度は $6 \times 10^{-6} \text{ dn}/(\text{J}/\text{cm}^2)$ である。これを一般的な感度に変換すると 0.5 cm/mJ となる。この換算には dn で表される屈折率差の値が必要である。平面波テストにおける屈折率差は式(4.1)で与えられ, 2 光束の角度 44° から, $\theta_R = \theta_S = 22^\circ$ を代入して算出した^[23]。

$$\Delta n = \frac{M\#}{\pi L} \lambda \sqrt{\cos\theta_R \cos\theta_S} \quad (4.1)$$

露光時間の初期値を検討する。記録露光時間と再生露光時間を同じ値に設定した。カメラ上で 4 nJ 以上のエネルギーが必要とされており、ページデータ容量は InPhase 試作ドライブでは 1440kbit である。カメラ上で必要なエネルギーはページデータ容量に比例するものとして、モノキュラ光学系は 2305kbit であるため、6.4 nJ 必要である。図 4.2 に露光時間と回折光のエネルギーの関係を示す。図より 6.4nJ が得られる 1.5 ms に露光時間を設定した。InPhase 社の試作ドライブの露光スケジューリングは Layer 1 で約 1 ms, Layer 2 で 2.4 ms であることから妥当と判断した。

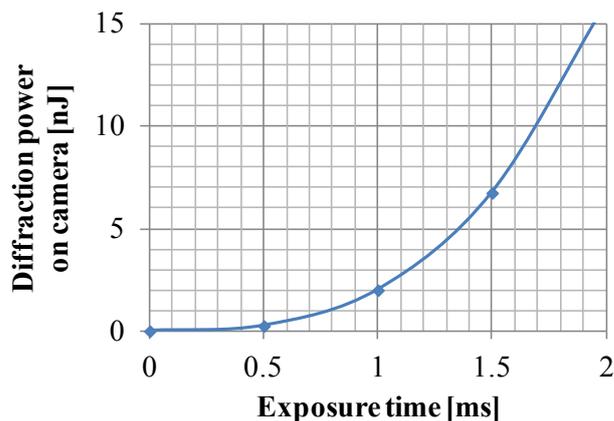


図 4.2 露光時間とカメラ上の回折光エネルギーの関係

媒体ノイズは InPhase 試作ドライブの 1 ページの品質 (InPhase 定義の SNR で 8dB, 一般の定義の SNR で 10dB 相当)と等価となるように設定したところ、ノイズ量 26.3%となった。

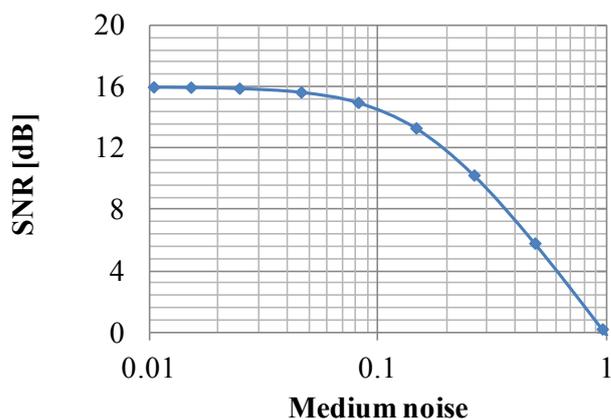


図 4.3 媒体ノイズの設定

表 4.2 と表 4.3 に記録時と再生時の光学効率を示す。図 2.2 における各光学部品の透過率を一般的に想定される値を基に設定した。なお、記録時における PBS1 における信号光と参照光の分配比は 50%，SLM はホワイトレート 50% で反射率 80% を想定した。

表 4.2 記録時の光学効率

| Common path | | Common path | |
|-------------------------|-------------|-------------------------|--------------|
| Anamorphic prism | 80% | Anamorphic prism | 80% |
| Homogenization | 50% | Homogenization | 50% |
| HWP | 95% | HWP | 95% |
| PBS1 | 90% | PBS1 | 90% |
| Signal beam path | | Reference beam path | |
| Expander | 90% | Mirror | 98% |
| Phase mask | 95% | Mirror | 98% |
| Relay lens | 80% | Galvo | 98% |
| PBS2 | 90% | Lens | 80% |
| SLM | 40% | Objective lens | 80% |
| Relay lens | 80% | Total efficiency | 20.6% |
| Objective lens | 80% | | |
| Total efficiency | 5.4% | | |

表 4.3 再生時の光学効率

| Common path | | Common path | |
|-------------------------|-------------|-------------------------|--------------|
| Anamorphic prism | 80% | Anamorphic prism | 80% |
| Homogenization | 50% | Homogenization | 50% |
| HWP | 95% | HWP | 95% |
| PBS1 | 90% | PBS1 | 90% |
| Signal beam path | | Reference beam path | |
| Expander | 90% | Mirror | 98% |
| Phase mask | 95% | Mirror | 98% |
| Relay lens | 80% | Galvo | 98% |
| PBS2 | 90% | Lens | 80% |
| SLM | 40% | Objective lens | 80% |
| Relay lens | 80% | Total efficiency | 20.6% |
| Objective lens | 80% | | |
| Total efficiency | 5.4% | | |

以上で設定した初期パラメータを用いた場合の性能を表 4.4 に示す。比較として InPhase 試作ドライブの性能との比較を示す。

モノキュラ光学系はページデータサイズとブック数の向上により容量は 2.96 倍向上している。シミュレーション結果の方が InPhase 試作ドライブよりもブック数が 1.88 倍多いのは、InPhase 試作ドライブで

はラジアル方向のブック配置に余裕を持った設計をしているためである。InPhase社はロードマップ上では Waveformat 等の技術によりさらに敷き詰めることを予定している。図 2.4 で示したように、モノキュラー光学系は通常の 2 光束と比較してページデータ容量を大きくできる点が有利である。図 2.4 からは信号光最内角が 23.5° のとき、ページデータ容量の比率は 1.4 倍であるが、表 4.4 では 1.60 倍となっているのは、InPhase では対物レンズの有効径を限界まで使用したフォーマットではないためである。転送速度はページデータ容量の増加により 1.61 倍向上している。M/#については、容量の増加分だけ増えるのが妥当だが、1.38 倍にしかなっていない。このことから InPhase はメディアの M/#に余裕を持った設計をしていると考えられる。

表 4.4 初期パラメータを用いた場合の性能

| | Unit | InPhase | Simulation result | Ratio |
|---------------------|------|---------|-------------------|-------|
| Capacity | TB | 0.360 | 1.07 | 2.96 |
| Data transfer rate | MB/s | 20.0 | 32.3 | 1.61 |
| M/# | /mm | 20.0 | 27.6 | 1.38 |
| Page data size | Kbit | 1440 | 2305 | 1.60 |
| Multiplexing number | | 320 | 320 | 1.00 |
| Book number | | 16524 | 31135 | 1.88 |

光学パラメータ最適化

波長、記録層厚み、ピクセルピッチ、焦点距離、信号光最内角のパラメータを変化させ、記録容量、転送速度、M/#消費、M/#利用効率に対する影響をシミュレーションした結果を図 4.4 に示す。また、記録容量と転送速度の変化が何に起因するものであるかを考えるため、ページデータ容量、多重数、ブック数の基準値に対する変化も示す。いずれも、表 2.2 で示した傾向と一致している。個々についての説明は煩雑になるため、ここでは、各パラメータがどのように記録容量の向上と関わっているかについて説明する。

波長を短くすると角度選択性が狭くなり、ピクセルによる回折量は小さくなるため、多重数とブック数が増加し、記録容量が向上する。

記録層の厚みを増やすと角度選択性が狭くなるため、多重数が増加し、記録容量が向上する。

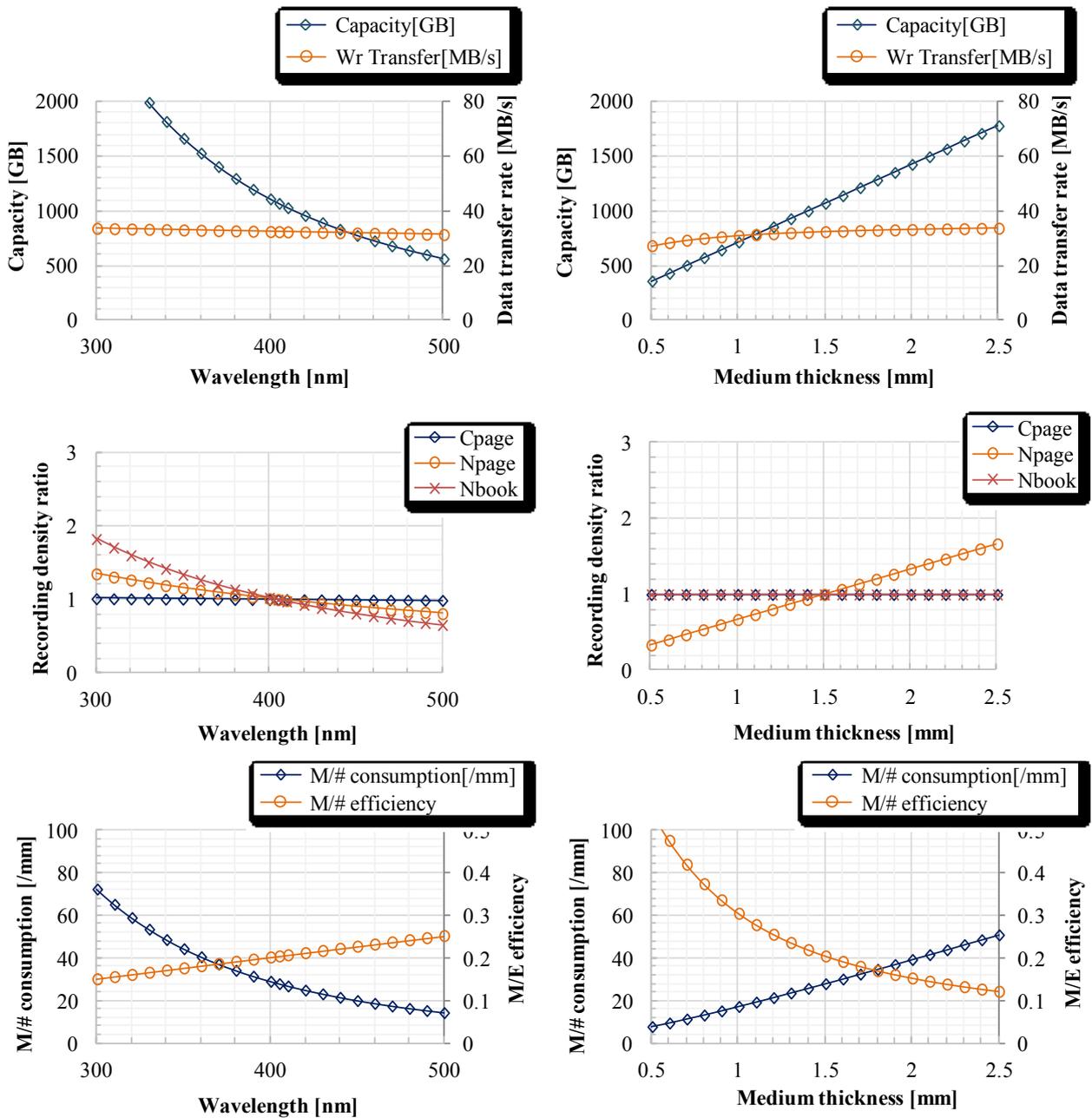


図 4.4 ドライブ性能の光学パラメータ依存

ピクセルピッチを大きくするとピクセルによる回折量が小さくなり、ブック数は増えるが、ページデータ容量が低下するため、互いに相殺し、記録容量はほとんど変化しない。記録容量が微増するのは、回折量が低下し、同じ対物レンズ径であっても、僅かに有効径が増えるためである。

焦点距離の変化に対して波はピクセルピッチと逆の特性となる。焦点距離が小さくなると回折光量が小さくなるため、ブック数は増えるが、同じ NA に対してはレンズ径が小さくなりページデータ容量が低下するため、互いに相殺し、記録容量は変化しない。

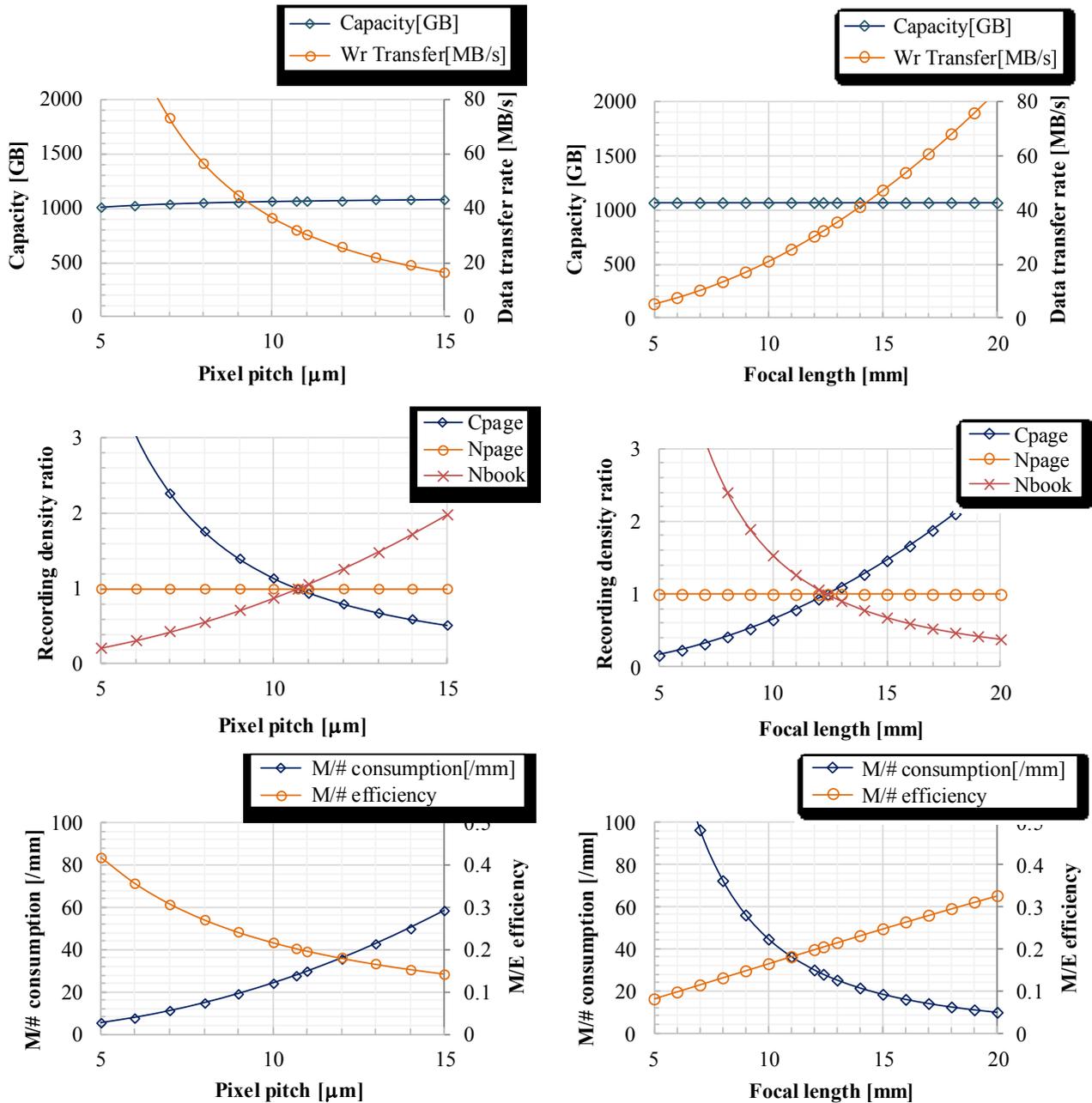


図 4.4 (Cont.) ドライブ性能の光学パラメータ依存

信号光最内角を小さくすると、ページデータ容量が小さくなるが、参照光の角度走査範囲が増えるため多重数は増加する。信号光最内角 0° 付近で容量が最大となる。一方で、信号光最内角 30° 付近で転送速度は最大となる。

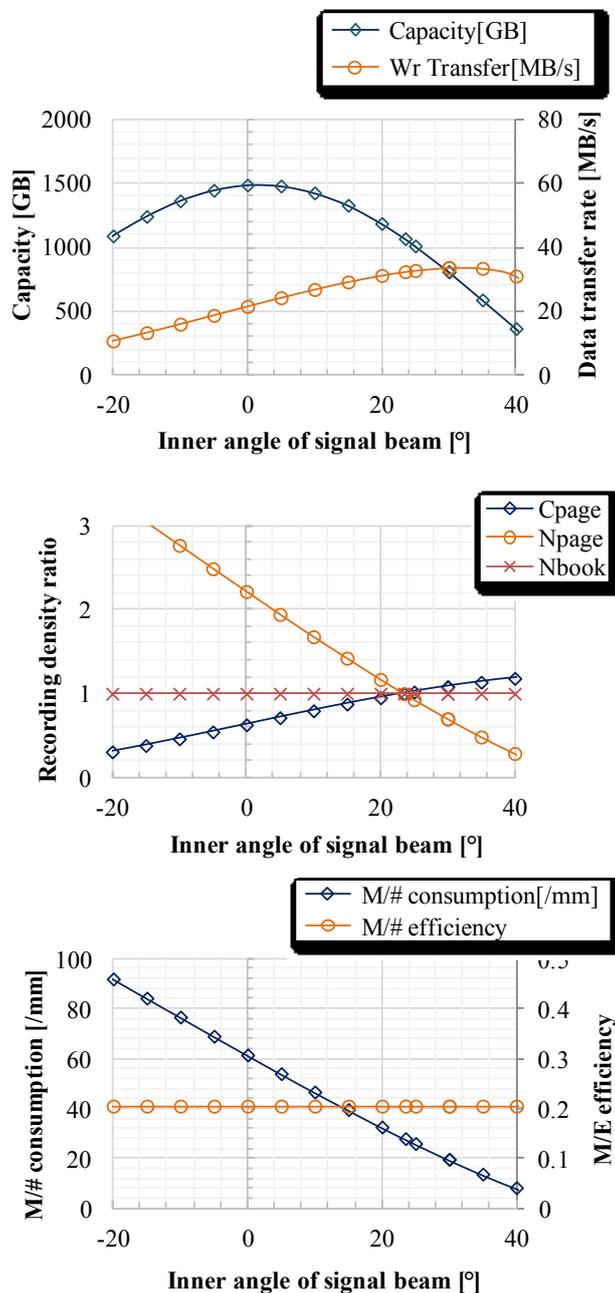


図 4.4 (Cont.) ドライブ性能の光学パラメータ依存

以上より、記録容量を向上させるためには、波長を短くすること、記録層厚みを厚くすること、信号光最内角を 0° に設定することが有効である。しかしながら、波長については光源やメディアの新規開発が必要となるため、短波長化は難しい。記録層は厚くすると M/# の利用効率が低下するため、メディア開発に負担がかかる。そこで、設

計変更が容易で、M/#利用効率も変化しない、信号光最内角を 0°に再設計することで、記録容量を向上させることとした。表 4.5 に信号光最内角を最適化した結果を示す。表 4.4 の初期設計の結果を比較対象とした。表よりページデータ容量は低下するが、それ以上に多重数が増えるために容量が向上することが分かる。一方で、転送速度はページデータ容量が低下するために低下している。なお、ページデータ容量が小さくなったことで、SLM の 1 ピクセルあたりに割り当てられるパワーが大きくなったため、再度露光時間を最適化した結果、1.3 ms となった。

表 4.5 信号光最内角最適化後の性能

| | Unit | Monocular and book allocation | Optimization of inner angle of signal beam | Ratio |
|---------------------|------|-------------------------------|--|-------|
| Capacity | TB | 1.07 | 1.48 | 1.39 |
| Data transfer rate | MB/s | 32.3 | 22.9 | 0.71 |
| M/# | /mm | 27.6 | 53.0 | 1.92 |
| Page data size | kbit | 2305 | 1450 | 0.63 |
| Multiplexing number | | 320 | 709 | 2.22 |
| Book number | | 31135 | 31135 | 1.00 |

クロストーク性ノイズ配分最適化

ピクセル間クロストークとページ間クロストークの 2 種類のノイズの配分を最適化するため、まずは複数のノイズを配分する方法について説明する。

ノイズの指標として正規化ノイズ σ を次式で定義する。

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}}{\mu_{on} - \mu_{off}} \quad (4.2)$$

基準となる信号品質における正規化ノイズを固定ノイズ σ_0 、ノイズを印加した際に増えたノイズ量を固有ノイズ σ_i (i はノイズの種類を表す正の整数) とすると、独立事象のノイズは二乗和平方根で求められることから、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_i^2} \quad (4.3)$$

これより、固有ノイズは、

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_0^2} \quad (4.4)$$

各固有ノイズが求まったとして、全てのノイズが加わった結果の正規化ノイズは、固有ノイズ同士が独立の事象であるという仮定で、式(4.5)で求められる。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (4.5)$$

許容可能な正規化ノイズを σ_h として式(4.5)の σ に代入すると、許容可能な固有ノイズの合計は次式となる。

$$\sqrt{\sigma_{th}^2 - \sigma_0^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (4.6)$$

ノイズ配分の手順としては、式(4.6)の左辺を最初に決定しておき、各固有ノイズを変化させながら右辺が許容可能な範囲内に収まるように設計する。

パラメータが多数ある場合には、全てのノイズの組合せを求めると膨大なシミュレーションもしくは測定が必要となり、現実的ではないため、個別のノイズの特性を調査した上で、各ノイズ量を決定し、最終確認として全てのノイズを印加して許容ノイズ量に収まるかを判定する。

ここではノイズ量は2種類のみであるため、両者の組合せをシミュレーションによって求め、ノイズの配分を最適化する。

表 4.5 で決定した条件において、1 ページのみの信号品質 σ_0 と709 多重時の信号品質 σ_{th} をシミュレーションすると、 $\sigma_0=30.7\%$ 、 $\sigma_{th}=50.4\%$ であり、許容ノイズ量は式(4.6)より、39.9%となる。

図 4.5 にピクセル間クロストークとページ間クロストークを変化させた場合、すなわち、フィルタサイズと多重数を変化させた場合の(a)固有ノイズと(b)記録容量の変化を示す。横軸のフィルタサイズ変更による記録密度の変化と縦軸の多重数の変更による記録密度の変化は、フィルタサイズ $\sqrt{1.5}$ 、多重数 709 を基準とした高密度化の比率として表している。固有ノイズが横軸 1.5 よりも右側で急激に上昇するのはフィルタサイズが 1 以下、つまりナイキストサイズ以下となるためである。初期状態と同じ固有ノイズでもフィルタサイズを縮小し、多重数を低下させることで、高密度化できることが分かる。フィルタサイズが 1 よりも小さくなると、フィルタのサイズばらつきや再生時のブックの位置ずれ等により、急激にノイズが増加する恐れがあるため、マージンを考慮し横軸 1.40 倍、縦軸 0.88 倍の位置に再設計することで高密度化をすることとした。

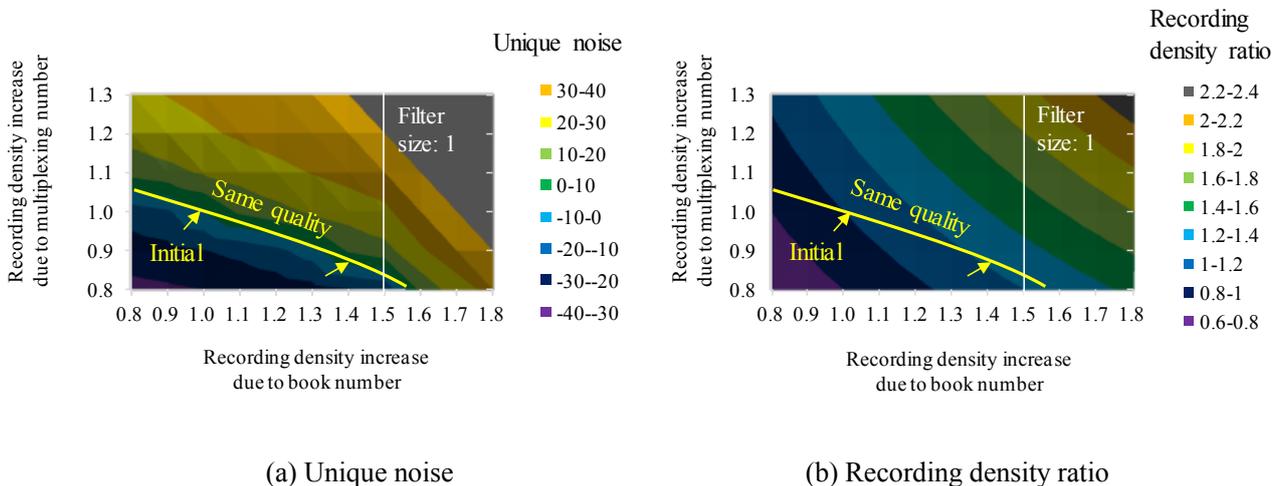


図 4.5 ピクセル間クロストークとページ間クロストークのノイズ配分最適化

表 4.6 にピクセル間クロストークとページ間クロストークのノイズ配分を最適化した後の性能を示す。記録容量は 24%増加した。

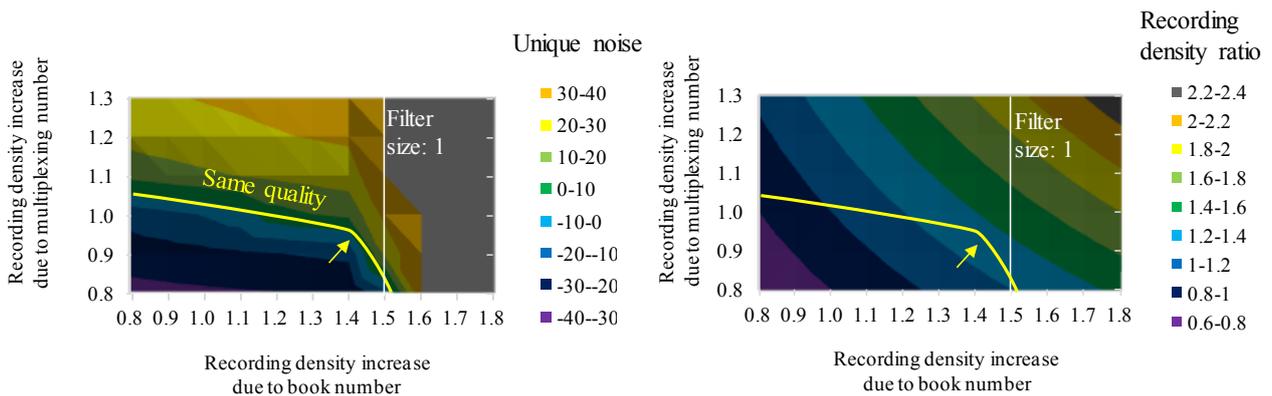
表 4.6 ピクセル間クロストークとページ間クロストークのノイズ配分最適化後の性能

| | Unit | Optimization of inner angle of signal beam | Optimization of filter size and angle spacing | Ratio |
|---------------------|------|--|---|-------|
| Capacity | TB | 1.48 | 1.84 | 1.24 |
| Data transfer rate | MB/s | 22.9 | 27.6 | 1.21 |
| M/# | /mm | 53.0 | 66 | 1.25 |
| Page data size | kbit | 1450 | 1463 | 1.01 |
| Multiplexing number | | 709 | 621 | 0.88 |
| Book number | | 31135 | 43587 | 1.40 |

ピクセル間クロストークキャンセル適用による高密度化

第 3.1 節と第 3.2 節で検討したピクセル間クロストークキャンセルとページ間クロストークキャンセルはノイズを低減して信頼性を高める技術として適用することもできるが、元々の設計で記録再生に十分な品質が確保できていれば、同技術の適用によりさらにフィルタサイズを縮小したりページ間隔を狭めたりすることが可能であり、高密度化に寄与することができる。そこで、クロストークキャンセルの適用により、復号に必要な所定の信号品質を確保しながら、どこまで記録密度を向上できるかについて検討する。

図 4.6 にピクセル間クロストークキャンセルを適用した状態で、ピクセル間クロストークとページ間クロストークを変化させた場合、すなわち、フィルタサイズと多重数を変化させた場合の(a)固有ノイズと(b)記録容量の変化を示す。クロストークキャンセル適用前の図 4.5 の段階でフィルタサイズは 1.07 と 1 に近い設計になっているため、これ以上フィルタサイズを小さくするよりもページ間隔を狭めて多重数を増やす方向で記録密度を向上させることとした。表 4.7 に高密度化の結果を示す。ピクセル間クロストークキャンセル適用により多重数が 10% 増え、記録密度が 10% 向上した。



(a) Unique noise

(b) Recording density ratio

図 4.6 ピクセル間クロストークキャンセル技術適用による高密度化

表 4.7 ピクセル間クロストークキャンセル適用による高密度化

| | Unit | Optimization of filter size and angle spacing | Inter-pixel crosstalk cancel | Ratio |
|---------------------|------|--|------------------------------|-------|
| Capacity | TB | 1.84 | 2.02 | 1.10 |
| Data transfer rate | MB/s | 27.6 | 27.7 | 1.00 |
| M/# | /mm | 66.0 | 72.5 | 1.10 |
| Page data size | kbit | 1463 | 1463 | 1.00 |
| Multiplexing number | | 621 | 682 | 1.10 |
| Book number | | 43587 | 43587 | 1.00 |

ページ間クロストークキャンセル適用による高密度化

図 4.7 にページ間クロストークキャンセルを適用した状態で、ピクセル間クロストークとページ間クロストークを変化させた場合の(a)固有ノイズと(b)記録容量の変化を示す。表 4.8 に高密度化の結果を示す。ページ間クロストークキャンセル適用により多重数が 88%増え、記録密度が 75%向上した。

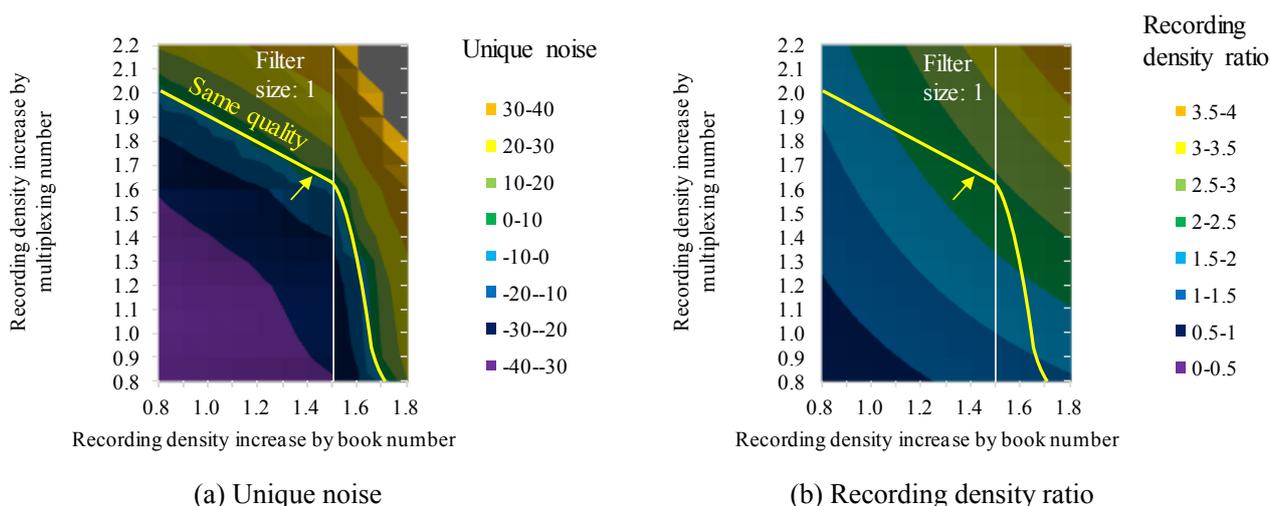


図 4.7 ページ間クロストークキャンセル適用による高密度化

表 4.8 ページ間クロストークキャンセル適用による高密度化

| | Unit | Optimization of filter size and angle spacing | Inter-page crosstalk cancel | Ratio |
|---------------------|------|--|-----------------------------|-------|
| Capacity | TB | 1.84 | 3.20 | 1.75 |
| Data transfer rate | MB/s | 27.6 | 28.4 | 1.03 |
| M/# | /mm | 66.0 | 115.1 | 1.74 |
| Page data size | kbit | 1463 | 1460 | 1.00 |
| Multiplexing number | | 621 | 1169 | 1.88 |
| Book number | | 43587 | 40471 | 0.93 |

最終到達密度

図 4.8 にピクセル間クロストークキャンセルとページ間クロストークキャンセルを適用した状態で、ピクセル間クロストークとページ間クロストークを変化させた場合の(a)固有ノイズと(b)記録容量の変化を示す。表 4.9 に高密度化の結果を示す。2 つのクロストークキャンセル適用により多重数が 105%増え、記録密度が 90%向上した。最終的に記録容量は 3.49 TB となった。

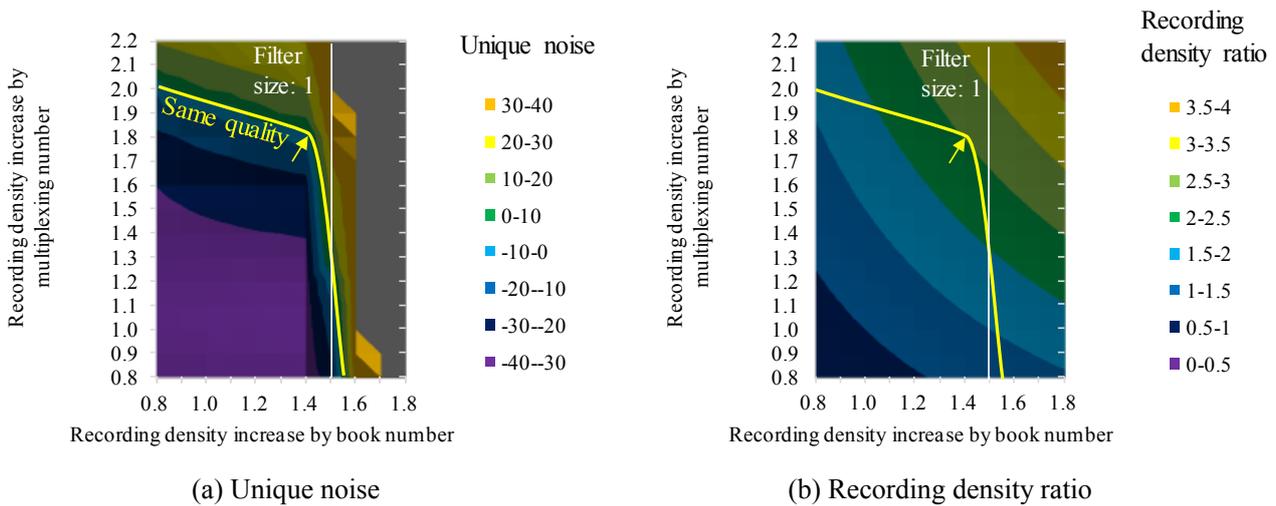


図 4.8 ピクセル間クロストーク低減技術とページ間クロストーク低減技術適用による高密度化

表 4.9 ピクセル間クロストーク低減技術とページ間クロストーク低減技術適用による高密度化

| | Unit | Optimization of filter size and angle spacing | Combination of two crosstalk cancels | Ratio |
|---------------------|------|--|---|-------|
| Capacity | TB | 1.84 | 3.49 | 1.90 |
| Data transfer rate | MB/s | 27.6 | 28.5 | 1.03 |
| M/# | /mm | 66.0 | 125.5 | 1.90 |
| Page data size | kbit | 1463 | 1460 | 1.00 |
| Multiplexing number | | 621 | 1275 | 2.05 |
| Book number | | 43587 | 40471 | 0.93 |

4.2 転送速度最大化

初期パラメータは前節と同じとして、光学パラメータ最適化を行う。

光学パラメータ最適化に関する検討内容は記録容量の最大化で検討した図 4.4 と同一であるが、本節では転送速度が最大化するように検討する。図 4.4 より分かるように、転送速度の向上に効果があるのは、ピクセルピッチを小さくすること、対物レンズの焦点距離を大きくすること、信号光の最内角を最適化することの 3 点である。

図 4.4 の信号光の最内角の結果より、転送速度を最大化するために信号光の最内角を 23.5°から 30.0°にした場合の性能を表 4.10 に示す。転送速度は 4%しか向上しないのに対して、容量は 24%も低下する。このため、信

号光の最内角は 23.5°から変更しないこととした。

表 4.10 転送速度向上のための信号光最内角最適化後の性能

| | Unit | Monocular and book allocation | Optimization of inner angle of signal beam | Ratio |
|---------------------|------|----------------------------------|---|-------|
| Capacity | TB | 1.07 | 0.807 | 0.76 |
| Data transfer rate | MB/s | 32.3 | 33.6 | 1.04 |
| M/# | /mm | 27.6 | 19.3 | 0.70 |
| Page data size | kbit | 2305 | 2494 | 1.08 |
| Multiplexing number | | 320 | 224 | 0.70 |
| Book number | | 31135 | 31135 | 1.00 |

ピクセルピッチと対物レンズについては、現実的にはデバイス性能に依存する。ここでは過去に発表のあった、ピクセルピッチ 7.8 μm 、一辺のピクセル数 2100 画素の SLM^[24]を適用する場合を考える。当該 SLM が対物レンズ NA0.85 の条件で SLM を有効に利用できるように配置するには焦点距離 10.0mm となる。また、レーザーパワー 100mW^[24]を考慮すると、記録露光時間は 0.7ms となる。ページ間の移動時間 0.3ms^[24]も考慮した場合の性能を表 4.11 に示す。転送速度は 202%向上して、97.4MB/s となる。

表 4.11 転送速度向上のためのデバイス変更後の性能

| | Unit | Monocular and book allocation | Improvement of devices and servo control | Ratio |
|---------------------|------|----------------------------------|---|-------|
| Capacity | TB | 1.07 | 1.05 | 0.98 |
| Data transfer rate | MB/s | 32.3 | 97.4 | 3.02 |
| M/# | /mm | 27.6 | 25.9 | 0.94 |
| Page data size | kbit | 2305 | 2757 | 1.20 |
| Multiplexing number | | 320 | 320 | 1.00 |
| Book number | | 31135 | 25584 | 0.82 |

4.3 第 4 章の結論

本章では第 2 章で構築したシステム性能評価モデルを用い、InPhase 社の試作ドライブのパラメータを出発点として記録密度と転送速度の観点でパラメータの最適化を行い、設計指針を明らかにした。検討の結果、以下の結論を得た。

- ・記録容量を向上させるためには、波長を短くすること、記録層厚みを厚くすること、信号光最内角を 0°に設定することが有効である。信号光最内角の再設計は、設計変更が容易で、M/#利用効率を変化させずに記録容量を向上させることができる。

- ・フィルタサイズと多重数を変化させることで、ピクセル間クロストークとページ間クロストークのバランスを調整することで、信号品質を一定に保ちながら記録容量を変えることができる。

・InPhase 社の試作ドライブのパラメータを出発点とした場合、以上の設計を最適化し、ピクセル間クロストークキャンセルとページ間クロストークキャンセル技術を適用することにより、ディスク 1 枚あたりの記録容量を設計上は 3.49 TB に高めることができる。

・InPhase 社の試作ドライブのパラメータを出発点とした場合、現状のデバイス性能を基準にし、ページ間移動の高速化を図ることで、20.0 MB/s の転送速度を設計上は 97.4 MB/s まで高めることができる。

5 結論

本研究では角度多重方式ホログラフィックメモリのシステム性能を評価可能なモデルを構築し、容量と転送速度の観点からパラメータを最適化する設計指針を示すことを目的として研究を行った。以下、各章の要約を示す。

第 1 章では、磁気テープ、HDD、フラッシュストレージと光ディスクの特性を比較し光ディスクがアーカイブストレージに適していること、光ディスクの中ではホログラフィックメモリが大容量と高転送速度の面で有利であること、ホログラフィックメモリの中では本研究の対象となる角度多重方式が大容量化に向いていることを明らかにした。また、角度多重方式の実現には振動の対策が重要であることを示した。

第 2 章では角度多重方式ホログラフィックメモリのシステムパラメータを最適化するためのモデルを構築した。まず、記録密度、転送速度、M/#消費とシステムパラメータとの関係を解析的に導出した。また、記録品質の指標となる SNR について、シミュレータを構築して算出する環境を構築した。また、振動の影響を評価するためのモデルを構築した。

パラメータ最適化においては、必要最低限の SNR を確保することが拘束条件となる。SNR を高められれば、大容量化と高転送速度化が可能のため、ノイズ低減が重要となる。そこで、第 3 章では 3 つのノイズ低減技術の検討を行った。

第 3.1 節では、高い SNR を保ったままフィルタサイズを縮小し高密度化を実現可能なチェッカーボード状の位相パターンでピクセル間に $\pi/2$ の位相差を付加したピクセル間クロストークキャンセル技術を開発した。本手法は 1 枚の位相板を信号光光路に配置するだけで、他の光学系や信号処理への変更は不要であるため、容易に実現可能である。フィルタサイズが 1.05 でノイズが無い状態では 6.5dB の SNR 改善効果が得られた。モノキュラ光学系で実際のノイズを想定すると 0.85dB の SNR 改善効果となった。実験系を用いた本手法の検証が今後必要である。

第 3.2 節では、ページ間クロストーク低減技術について検討した。隣接ページ間で位相差を付加することによりページ間クロストークを制御する 2 つの方式を考案した。一方は隣接ページ間でページ全体に $\pi/2$ の位相差を付加することによりクロストークをキャンセルする方式であり、もう一方は隣接ページ間で 1st null から 2nd null の領域に π の位相差を付加することにより信号を増幅する方式である。シミュレーションによるノイズ低減効果を比較した結果、前者は 17.3%、後者は 22.7%となった。また、実験により位相差付加によるノイズ低減効果を検証し、シミュレーションと実験で改善効果が同等の傾向であることを確認した。最後に実用上課題となる、高速な位相制御について検討し、2 枚の強誘電性液晶を用いた位相制御方式を提案した。ページ内で 1st null から 2nd null の領域にのみ位相差を付加する方式は、null となる位置がページ毎に変化すると制御が難しい点や、null となる位置で位相の変化が急峻であると回折が発生し、信号品質を劣化させる点など課題が多く、ページ全体で位相差 $\pi/2$ を

付加する方式が実用的である。

第 3.3 節では、角度多重方式ホログラフィックメモリにおいて、振動の影響を評価する実用的な手法を開発した。まず、RMS もしくは標準偏差に対する正規化再生光量の 2 次近次式を用いて、任意の波形の正規化再生光量を推定する手法を提案した。次に、提案した手法では参照光の角度方向とディスクのシフト方向について単一周波数の振動の正規化再生光量への影響を一度評価し、近似式を取得すれば良く、シミュレーションによって取得した正規化再生光量と推定した正規化再生光量との相関係数は 0.992 以上であり、精度良く振動の影響を評価できることを示した。振動波形の RMS もしくは標準偏差に対する正規化再生光量の応答が 2 次近似で表現できる理由についてストレーン比の導出と同様に説明可能であることを示した。最後に、開発した振動の影響解析手法を用いて記録停止処理を効率的に行う手法を開発した。開発した手法では、振動波形の RMS もしくは標準偏差が一定の閾値を超えた場合に記録停止をすることにより、不要な記録停止がなくなることを示した。

第 4 章では第 2 章で構築したシステム性能評価モデルを用いて、記録密度と転送速度の観点からパラメータの最適化を行い、設計指針を示した。InPhase 社の試作ドライブのパラメータを出発点として検討し、記録容量を向上させるために、信号光最内角を 0°に設定することが有効であることを示した。次に、ピクセル間クロストークとページ間クロストークのバランスを調整することで、信号品質を一定に保ちながら記録容量を高めた。また、第 3 章で検討したピクセル間クロストークキャンセルとページ間クロストークキャンセル技術を適用することにより、ディスクあたりの記録容量はモノキュラ方式の適用とブックの敷詰めをした場合の 1.07 TB から最終的に 3.49 TB まで 3.3 倍高められる可能性を示した。転送速度に関しては、InPhase 社の試作ドライブのパラメータを出発点とした場合、現状のデバイス性能を基準にし、ページ間移動の高速化を図ることで、20.0 MB/s の転送速度を設計上は 97.4 MB/s まで高められることを示した。

本研究により、記録密度と転送速度に関して最適化するための設計指針を示した。M/#に関しては理論モデルの構築までを行った。例えばピクセルピッチを小さくすることや焦点距離を大きくすることで M/#の利用効率を高められることを示したが、この場合 1 ピクセルあたりの回折効率は低下するため、記録露光時間の最適化が必要となる。また、信号光と参照光の分光比は 50%を前提条件として検討したが、分光比を変えることで M/#利用効率は変化する。今後、これらの関係をモデル化し、1 ピクセルあたりの回折効率が一定となる条件で最適化を行うことで、M/#の利用効率を最大化する設計が可能となると考える。

参考文献

- [1] https://www.idc.com/IDC_Storage-infographic.jsp
- [2] IDC's Digital Universe, "The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things", Sponsored by EMC (2014).
- [3] 平成 27 年版 情報通信白書, 328 (2015).
- [4] N. Yamaoka, S. Murakami, Y. Sugawara, S. Ohshima, T. Takishita, and F. Yokogawa "Thermal Recording for 200GB SIL Disc Mastering", Technical Digest of ISOM 2009, Mo-D-04 (2009).
- [5] B. Hyot, F. Laulagnet, O. Lemonnier, and A. Fargeix, "Super-Resolution ROM Disc with a Semi-Conductive InSb Active Layer", Technical Digest of ISOM2007, Mo-B-04 (2007).
- [6] E. Walker, A. Dvornikov, K. Coblenz, and P. Rentzepis, "Terabyte recorded in two-photon 3D disk", Technical Digest of ISOM/ODS 2008, MB01 (2008).
- [7] K. Curtis, L. Dhar, A. J. Hill, W. L. Wilson, and M. R. Ayres, "Holographic Data Storage –From Theory to Practical Systems–", WILEY (2010).
- [8] 志村努 監修, "ホログラフィックメモリーのシステムと材料", シーエムシー出版, (2006)
- [9] D. Gabor, "A New Microscopic Principle", Nature **161**, 777 (1948).
- [10] van Heerden, "Theory of Optical Information Storage in Solids", Applied Optics **2**, 393 (1963).
- [11] K. Anderson, E. Fotheringham, A. Hill, B. Sissom, and K. Curtis, "High-Speed Holographic Data Storage at 500 Gbits/in.2", SMPTE Motion Image Journal **115**, 200 (2006).
- [12] I. Redmond, "The InPhase Professional Archive Drive OMA: Design and Function", Technical Digest of ODS 2006, MA1 (2006).
- [13] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, Y. Okamoto, H. Mori, A. Fukumoto, and K. Okada, "415 Gbit/in.2 recording in coaxial holographic storage using low-density parity-check codes", Technical Digest of ODS 2009, 64 (2009).
- [14] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, "Improved performance in coaxial holographic data recording", Optics Express **15**, 16196 (2007).
- [15] A. Fukumoto, "Development of a coaxial holographic data recording system", Technical Digest of ISOM/ODS'08 (2008).
- [16] H. Horimai, X.D. Tan and J. Li, "Collinear holography", Applied Optics **44**, 2575 (2005).
- [17] T. Hoshizawa, Y. Tada, and N. Nakai, "Holographic Data Storage System with Terabyte Capacity and Gigabit Transfer Rate", ISOM Technical Digest 2015, 6 (2015).
- [18] F. Askham, M. R. Ayres, and A. C. Urness, "High dynamic range holographic data storage media", Proceedings of SPIE **9587**, 958708 (2015).
- [19] M. Omori, N. Mori, and N. Dejima, "Tunable light source with GaN-based violet laser diode", Proceedings of SPIE **8625**, 86251A (2013).
- [20] A. Hoskins, A. Hill, P. Smith, and K. Curtis, "Using Bragg effects to determine media orientation and wavelength detuning in a holographic data storage system", International Workshop Holographic Memory 2007, 27p13 (2007).

- [21] K. Anderson and K. Curtis, "Polytopic multiplexing", *Optics Letters* **29**, 1402 (2004).
- [22] S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan, and R. Snyder, "High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system", *Applied Optics* **43**, 4902 (2004).
- [23] L. Dhar, M. G. Schnoes, T. L. Wysocki, H. Bair, M. Schilling, and C. Boyd, "Temperature-induced changes in photopolymer volume holograms", *Applied Physics Letters* **73**, 1337 (1998).
- [24] T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita, and Y. Tada, "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate", *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 09SA06 (2016).
- [25] K. Kuroda, Y. Matsubashi, R. Fujimura, and T. Shimura, "Theory of polarization holography", *Optical Review* **18**, 374 (2011).
- [26] D. Barada, K. Tamura, T. Fukuda, M. Itoh, and T. Yatagai, "Retardagraphy: a technique for optical recording of the retardance pattern of an optical anisotropic object on a polarization-sensitive film using a single beam", *Optics Letters* **33**, 3007 (2008).
- [27] T. Nobukawa, T. Fukuda, D. Barada, and T. Nomura, "Coaxial polarization holographic data recording on a polarization-sensitive medium", *Optics Letters* **41**, 4919 (2016).
- [28] J. Zang, G. Kang, P. Li, Y. Liu, F. Fan, Y. Hong, Y. Huang, X. Tan, A. Wu, T. Shimura, and K. Kuroda, "Dual-channel recording based on the null reconstruction effect of orthogonal linear polarization holography", *Optics Letters* **42**, 1377 (2017).
- [29] M. Bunsen, S. Umetsu, M. Takabayashi, and A. Okamoto, "Method of Phase and Amplitude Modulation/Demodulation Using Datapages with Embedded Phase-Shift for Holographic Data Storage", *Japanese Journal of Applied Physics* **52**, 09LD04 (2013).
- [30] A. C. Urness, W. L. Wilson, and M. R. Ayres, "Homodyne detection of holographic memory systems", *Proceedings of the SPIE* **9201**, 92010Y (2014).
- [31] K. Tajima, Y. Nakamura, and T. Hoshizawa, "High-density recording in holographic data storage system by dual 2-level run-length-limited modulation", *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 09SA09 (2016).
- [32] T. Ishii, M. Hosaka, T. Hoshizawa, M. Yamaguchi, S. Koga, and A. Tanaka, "Terabyte holographic recording with monocular architecture", *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 427 (2012).
- [33] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Control of Angular Intervals for Angle-Multiplexed Holographic Memory", *Japanese Journal of Applied Physics* **48**, 03A029 (2009).
- [34] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, H. Kikuchi, N. Shimidzu, T. Ando, K. Masaki, and T. Shimizu, "Angular Spacing Control for Segmented Data Pages in Angle-Multiplexed Holographic Memory", *Japanese Journal of Applied Physics* **50**, 09ME02 (2011).
- [35] H. M. P. Chen, Y. Y. Tsai, C. W. Lin and H. P. D. Shieh : "Novel ferroelectric liquid crystals consisting glassy liquid crystal as chiral dopants", *Proceedings of the SPIE* **6332**, Liquid Crystals X, 63320G (2006).
- [36] T. H. Jeong and G. Schwarz, "Uranium Hydrite Getter for Noble-Gas Lasers", *American Journal of Physics* **35**, ix (1967).

- [37] Y. Matsumura, S. Hori, H. Sekine, K. Kogure, and M. Shimizu, "Tilt Compensation Method of Two-Beam Angle Multiplexing Holographic Memory", *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, 3837 (2007).
- [38] N. Kim, K. Jung, K. Kim, P. Yoon, J. Park, and J. Park, "A novel angle servo for holographic data storage system", *Proceedings of the SPIE* **6620**, 66201M (2007).
- [39] A. Hoskins, B. Sissom, and K. Curtis, "Tolerances of a Page-Based Holographic Data Storage System", *Technical Digest of Optical Data Storage 2007*, WB2 (2007).
- [40] H. Y. S. Li and D. Psaltis, "Alignment sensitivity of holographic three-dimensional disks", *Journal of the Optical Society of America A* **12**, 1902 (1995).
- [41] M. R. Ayres, A. Hoskins, P. C. Smith, and J. Kane, "Wobble alignment for angularly multiplexed holograms", *Technical Digest of Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2008*, ThC01 (2008).
- [42] C. W. Lee, B. S. Kwak, C. C. Chung, and M. Tomizuka, "Design of the Tracking Controller for Holographic Digital Data Storage", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **15**, 242 (2010).
- [43] D. B. Neumann and H. W. Rose, "Improvement of Recorded Holographic Fringes by Feedback Control", *Applied Optics* **6**, 1097 (1967).
- [44] H. Rose and H. Pruetz, "Stabilization of Holographic Fringes by FM Feedback", *Applied Optics* **7**, 87 (1968).
- [45] D. R. MacQuigg, "Hologram fringe stabilization method", *Applied Optics* **16**, 291 (1977).
- [46] K. Curtis, "Holographic Storage: Advanced Systems and Media", *ISOM/ODS 2008*, SC917 (2008).
- [47] J. Yang, S. H. Kim, J. H. Kim, H. Yang, J. Y. Park, N. C. Park, and Y. P. Park, "Real time servo control of the holographic data storage system with an additional servo beam", *Microsystem Technologies* **13**, 1397 (2007).
- [48] J. Yang, H. Yang, S. H. Kim, J. Y. Park, and Y. P. Park, "Design of tracking servo control system for holographic data storage", *Microsystem Technologies* **15**, 1711 (2009).
- [49] S. Y. Lim, N. Kim, K. Jung, J. S. Lee, Y. K. Kang, H. Yang, K. S. Park, N. C. Park, and Y. P. Park, "Tracking servo method for holographic data storage using discrete pre-patterns", *Microsystem Technologies* **18**, 1711 (2012).
- [50] H. Horimai, Y. Aoki, K. Kimura, A. Togo, and Y. Sakane, "Optical information recording medium", U.S. Patent 7719952 (2010).
- [51] K. Kogure, K. Curtis, and K. E. Anderson, "Vibration detection apparatus, hologram apparatus, vibration detection method for the vibration detection apparatus, and recording method for the hologram apparatus", U.S. Patent 7471429 (2008).
- [52] R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction", *Journal of the Optical Society of America* **55**, 1593 (1965).
- [53] R. J. Pryputniewicz, "Time average holography in vibration analysis", *Optical Engineering* **24** 843 (1985).
- [54] K. Shimada, T. Ishii, T. Hoshizawa, and Y. Takashima, "New optical modeling and optical compensation for mechanical instabilities on holographic data storage system using time averaged holography", *Japanese Journal of Applied Physics* **54**, 09MA01 (2015).
- [55] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1970) 517.

謝辞

本研究の遂行と本論分の執筆にあたり、社会人博士課程の形で受け入れていただき、3年間に渡り懇切丁寧にご指導いただいた藤村 隆史 准教授に感謝いたします。会社の業務に追われて僅かにしか研究が進まないときもありましたが、常に検討した内容を掘り下げ、深く議論いただき研究の方向性を示していただきました。筆者にとって先生と議論できる時間は純粋に学問を迫及することができる貴重な時間でした。

本論分の執筆に際して、ご多忙な中、様々なご助言とご指導をいただきました谷田貝 豊彦 教授、大谷 幸利 教授、湯上 登 教授、杉原 興浩 教授、山本 裕紹 准教授に感謝いたします。

本論分の振動の影響解析の研究を進めるのにあたり、アリゾナ大学の高島 譲 准教授に多大なるご指導をいただきました。先生には米国での研究生活の立上から未知の研究領域への取り組み方まで広くご指導いただきました。

本研究のピクセル間クロストークキャンセルでは中村 悠哉 氏に実験による検証を試みていただきました。粘り強く検討をしていただき感謝いたします。

社会人博士として宇都宮大学に入学することを許可していただいた株式会社日立製作所の関係者の皆様に感謝いたします。特に星沢 拓 部長には入学前から多くの応援とご指導をいただきました。

快く大学への入学を後押ししてくれた妻 桂に感謝いたします。平日の家事・子育てもままならない筆者にも関わらず、休日も研究に専念できるように応援してくれました。妻の支え無しには到底、研究を完遂することはできませんでした。休日に遊んであげられなくても、研究することを励ましてくれた息子 周と娘 央佳に感謝いたします。将来、筆者の研究が社会に貢献し、彼等の未来が明るいものになることを願ってやみません。

最後に、ここでお名前を挙げることはできませんでしたが、本研究に関わっていただいた全ての皆様にお礼を申し上げ、本論分の締めくくりとさせていただきます。

平成 30 年 1 月

石井 利樹

研究業績

学・協会誌論文(査読有り)

- [1] T. Ishii and R. Fujimura, “Interpixel crosstalk cancellation on holographic memory”, Japanese Journal of Applied Physics. 56, 09NA10 (2017).
- [2] 石井 利樹, 池田 直仁, 保坂 誠, 星沢 拓, ”角度多重方式ホログラフィックメモリーにおける位相制御を用いたページ間クロストーク低減“, 映像情報メディア学会誌, 71, 7, p.J192-J198 (2017)
- [3] T. Ishii, K. Shimada, T Hoshizawa and Y. Takashima, “Analysis of vibration effects on holographic data storage system”, Japanese Journal of Applied Physics. 54, 09MA04 (2015).
- [4] T. Ishii, K. Shimada, T Hoshizawa and Y. Takashima, “Modeling and analysis of vibration effects on signal quality for angular multiplexed holographic data storage”, Japanese Journal of Applied Physics. 55, 09SA05 (2016).

国際会議論文

- [1] T. Ishii and R. Fujimura, “Inter-pixel crosstalk cancellation on holographic memory”, International Symposium on optical memory 2016, Tu-J-05 (2016).
- [2] T. Ishii, K. Shimada, T Hoshizawa and Y. Takashima, “Efficient write mode control against vibration effect on holographic data storage system”, International Symposium on optical memory 2014, Th-PD-03 (2014).
- [3] T. Ishii, K. Shimada, T Hoshizawa and Y. Takashima, “Pre-write operation and post optical compensation for robust holographic data storage system”, International Symposium on optical memory 2015, We-L-02 (2015).