



角度多重ホログラフィックメモリの記録密度向上に関する研究

木下, 延博

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2014-08-22

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5260

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005260>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

角度多重ホログラフィックメモリの
記録密度向上に関する研究

平成23年1月

神戸大学大学院工学研究科

木下 延博

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本研究の構成	4
第2章	角度多重ホログラフィックメモリと記録密度向上の指針	8
2.1	緒言	8
2.2	ホログラフィックメモリと多重方式	8
2.2.1	波動方程式と光波の表現	8
2.2.2	ホログラフィーの原理	11
2.2.3	ホログラフィックメモリ	14
2.2.4	多重記録方式	18
2.3	記録再生実験装置	25
2.4	記録密度向上の指針	29
2.5	結言	31
第3章	記録再生シミュレータ	35
3.1	緒言	35
3.2	有限差分時間領域法によるシミュレータ	36
3.2.1	定式化	36
3.2.2	厳密結合波解析との比較	39
3.2.3	角度多重ホログラフィックメモリの再生シミュレーション	44
3.3	スカラー回折理論によるシミュレータ	53
3.3.1	シミュレーションモデルと定式化	53
3.3.2	結合波理論との比較	62
3.3.3	層分割数と解の精度	67
3.4	結言	70
第4章	ページデータ間角度間隔制御による多重数増加	74
4.1	緒言	74
4.2	角度選択性の媒体角度依存性	74
4.2.1	シミュレーション結果	75
4.2.2	実験測定結果	77
4.3	角度間隔の適応制御	79
4.4	結言	84

第 5 章	ページデータ内角度間隔制御による多重数増加	86
5.1	緒言	86
5.2	半ページ挿入法	86
5.3	数値シミュレーションによる角度間隔の見積り	89
5.3.1	角度選択性	90
5.3.2	角度間隔に対する信号対雑音比	92
5.4	実験結果	94
5.4.1	角度選択性	96
5.4.2	角度多重記録結果	97
5.5	結言	99
第 6 章	ノイズ低減と記録密度の算出	101
6.1	緒言	101
6.2	光学系におけるノイズの分離測定	102
6.2.1	規格化ノイズパワーの定義	102
6.2.2	ノイズパワーの測定	104
6.3	レンズによる高空間周波数成分劣化とその補償	109
6.3.1	周波数応答特性	109
6.3.2	高空間周波成分の増強	113
6.4	矩形開口による帯域制限	116
6.5	角度多重ホログラフィックメモリの記録密度算出	120
6.5.1	不可避ノイズ下での SNR の見積り	120
6.5.2	記録密度向上手法を用いた場合の記録密度	122
6.6	結言	126
第 7 章	結論	129
	謝辞	133
	本論文に関する発表論文，学術講演	134

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

光メモリすなわち光を用いた情報記録において、今日ではCompact Disc(CD)やDigital Versatile Disc(DVD)、Blu-ray Disc(BD)などの光ディスクが広く普及するに至った。世代を追うごとに、レーザー光源の短波長化や対物レンズの高開口数(NA)化により飛躍的に記録容量・密度を増し、格納できる情報も音声信号から映像信号へと変化した。また、当初は再生専用であった記録媒体も、追記型や書換型が登場し、マスプロダクトとしての配布用途から家庭内での個人的録画まで幅広く対応した。このような記録媒体のバリエーションに後押しされ、映像音響機器はもちろんコンピュータ付属のペリフェラル用途としても光ディスクドライブを安価に入手可能となった。当初策定されたBD規格 [1] は記録層数が片面最大2層、50 GByteの記録容量であったが、2010年には最大の片面記録層数4層、片面記録容量128 GByteのBDXLと呼ばれる仕様が発表された [2]。この背景には、通常のハイビジョン映像よりも情報量の多い3D映像の収録に対応する要請があった。

一方、映画産業や放送局の分野では、ハイビジョンを超える映像技術としてデジタルシネマやスーパーハイビジョン(UHDTV: ultra high definition television)などの高精細映像技術の開発が進められている [3-5]。デジタルシネマでは画素数4096×2160、UHDTVでは画素数7680×4320の超高精細映像を扱い、劇場から家庭内テレビまで大型のディスプレイサイズにおいても視覚上画素を認識せず高臨場感が得られる。このような映像の高精細化および映像信号の情報量増加に対し、これらを収録できる大容量光記録技術の実現が期待されている。

光メモリの容量と転送速度をさらに向上するには、例えば0.85を超える対物レンズの高NA化、光源波長を400 nm以下とする短波長化、また記録媒体の層数をさらに増やす多層化、などが考えられるが、これらはいずれも大きな障害をかかえている。

容量を 2 倍増加するには 40 ~ 50% の NA の向上が必要となり、そのための高 NA レンズとして SIL(solid immersion lens) や SIM(solid immersion mirror) を用いる近接場記録が提案された [6, 7] . しかしながら対物レンズ径を一定とした場合、レンズと光ディスクとの距離を極めて接近させなければならず媒体可換性に難があり、また多層化への対応が困難であることから、未だ実用化の見通しは得られていない。レンズ側の工夫ではなく、記録層に近接場光を発生させ、これにより微小マークの記録再生を行う Super-RENS(super-resolution near-field structure) は 1990 年代に Tominaga らにより提案された手法であるが、近年になりようやく 50 GByte の実証がなされた [8-10] . 一方短波長化の場合を考えると、レーザー光源の入手が容易でなく、また 400 nm 以下の紫外域波長を透過する特殊な光学材料が必要となる。多層化は比較的实现の見通しが立つものの、深い層ほど到達光量が小さいため記録再生に光源パワーを多く必要とし、また層間反射率や球面収差補正機構に精密な制御が不可欠となる [11, 12] . これらの技術研究は年を追うごとに進展しつつあり、その成果が国際会議などで報告されているが、いずれも決定的な次世代光メモリの候補となるには至っていない。

さて、従来の光ディスクとは全く異なる記録原理に基づく光メモリが、近年注目を集めている。これはホログラフィーを原理として用いるもので、ホログラフィックメモリと呼ばれる [13-16] . 媒体の記録層は比較的厚く、厚い層全体に情報を格納できることから、記録容量・密度の潜在能力は極めて高い。従来の光ディスクはピットまたはマークと呼ばれる点の有無を薄い記録層の面内方向に一つずつ記録していたが、ホログラフィックメモリは 0 または 1 が二次元アレイ状に並んだ「ページデータ」と呼ばれる画像を、一度の光アクセスで一括に記録または再生できることからデータ転送速度の面でも有利である。また、記録材料としてフォトポリマー [17] を用いた場合、光重合反応後は安定であるため長期保存性にも優れ、50 年以上に渡りデータを保持できるとされている。

ホログラフィーを光メモリとして利用するアイデア自体は古くから存在し [18, 19] , ホログラフィックメモリの研究自体も歴史は長い。1970 年代前半から LiNbO₃ などのフォトリフラクティブ結晶が記録媒体として用いられ始めたが、結晶中に情報を固定することが難しく、再生時の光照射によりデータが消去される課題もあった。かつてはホログラフィックメモリを構成する全てのデバイス性能が十分ではなく、基礎的研究に留まっていた。

1990年代に入り、ページデータを表示するための高画素数の空間光変調器 (SLM : spatial light modulator) , 再生ページデータを撮影する撮像素子 (Imager) , 小型で高出力かつコヒーレンス長の長いレーザー光源 , 高速信号処理回路 , そして感度の高いフォトポリマー材料が揃ったことにより、ホログラフィックメモリの研究は急速に進展した。

2000年以降、産業界において米国 InPhase Technologies 社や日本のオプトウエア社、SONY 社が実用化を目指した研究開発を進めたが [20–22] , 未だ実用機のリリースには至っていない。ホログラフィックメモリを構成する SLM や撮像素子などのデバイスとそれらを用いた光学系、あるいは記録媒体や信号処理手法は、米国の国家プロジェクトが牽引役となり大きく前進した [23–25] 。一方で、それらを統合してシステム化する際に必要な指標 (例えば再生信号品質や記録材料などに求められる要求仕様) が明確化されず、また競合技術である BD およびその延長技術が先行して進歩しつつある中で、インパクトのある容量と転送速度がホログラフィックメモリに求められ、実用機のリリースを困難にしたものと考えられる。

しかしながら先に述べたように、ホログラフィックメモリは容量・記録密度と転送速度の点で潜在能力が高く、次世代の光メモリとしての期待は大きい。高精細映像を扱う放送局や映画の分野だけでなく、医療機関での診療データや図書館での資料データなど大規模な情報を取り扱う分野でもホログラフィックメモリの登場が望まれており [26, 27] , そのための大容量化・高記録密度化は急務である。

このような背景のもと、本研究ではホログラフィックメモリの多重方式として角度多重方式にフォーカスし、最も魅力的な潜在能力である容量と記録密度を向上するために必要な、新しい多重数増加手法を検討する。さらに、ホログラフィックメモリ内の様々なノイズ要因を分類し、原理的に低減可能なノイズを除去した場合における角度多重ホログラフィックメモリの記録密度および記録容量を明らかにする。

本研究の目的は、ノイズ量と記録密度・容量の関係を明らかにするとともに、新たな記録密度向上手法を提案することで、BD の延長技術を上回るインパクトある記録密度・容量実現への見通しと、そこへ到達するための道筋についての知見を得、ホログラフィックメモリの早期実現に寄与することである。

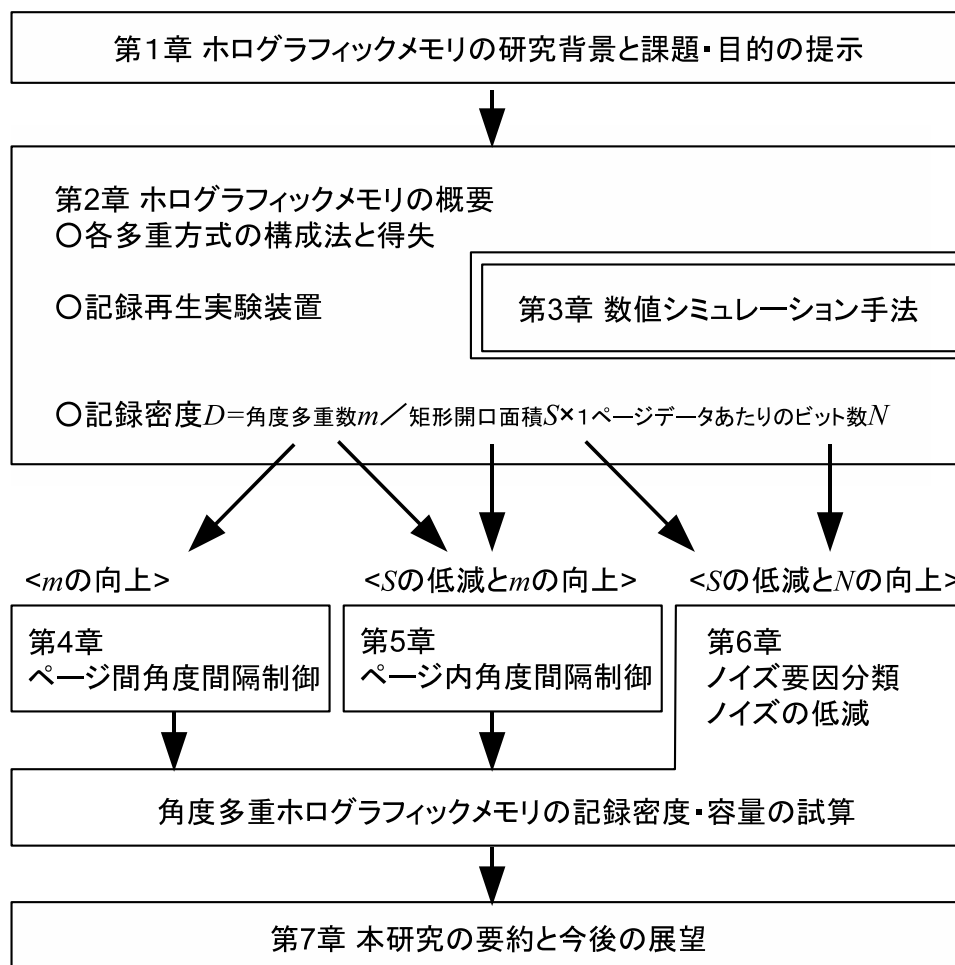


Fig. 1.1 Outline of the thesis.

1.2 本研究の構成

本論文の構成を Fig. 1.1 に示すとともに，以下に各章の概要を記す．

第 1 章ではホログラフィックメモリのこれまでの研究背景と，本研究の位置づけを説明した．

第 2 章ではホログラフィーについて，およびホログラフィーをメモリとして利用するための基本的構成法とさまざまな多重方式の構成法について述べ，多重方式ごとの得失を挙げる．本研究では特に機器互換性や機械精度の点において安定で，比較的高い記録密度が期待できる角度多重記録方式にフォーカスしたうえで，角度多重ホログラフィックメモリによる実験装置を詳述する．また角度多重ホログラフィックメモリの記録密度 D が，角度多重数 m とホログラム面積 S ，1 ページデータあたりのビット数

N で決定されることから、従来よりも記録密度を向上させるための指針を考察する。

第3章では、本論文で提案する記録密度向上手法の検証に不可欠となる、ホログラフィックメモリの数値シミュレーション手法について述べる。特に、記録媒体が信号光軸に傾斜して配置された場合のスカラー回折理論に基づくシミュレーション手法は過去に例がなく独自の手法であるため、その詳細を述べる。

従来の角度多重ホログラフィックメモリは角度間隔を一定として多重記録するものが主流であったが、さらなる角度多重数 m の向上を目指し、第4章ではホログラムごとの角度間隔適応制御を提案し、その効果を検証する。

ホログラム面積 S を縮小すれば記録密度 D を向上できる。そのためにはレンズの焦点距離を短くすることが効果的かつ不可欠となるが、この場合1つのページデータ内の場所（領域）ごとで角度選択性に差異を生じる。第5章では、ページデータ内での角度選択性の差異を積極的に活かすことで多重数 m を向上させる手法を提案し、その有効性を実験により確認する。

第6章では、ホログラフィックメモリシステム内におけるノイズ要因を列挙し、各ノイズ要因ごとにその量を分離して測定できる手法について述べる。ノイズ要因によっては原理的に不可避となるものも存在するが、多くのノイズ要因はその低減手法が提案されつつある。本論文においてもその一手法として、レンズなどの光学系における周波数伝達特性を逆補正することにより、高空間周波数成分の低下を補償する手法を提案する。また、第4章と第5章で提案した記録密度向上手法を用い、かつ不可避のノイズ要因のみ存在する場合について、角度多重方式における記録密度・容量を算出する。

第7章では、本論文の要約とともに、ホログラフィックメモリの今後の可能性と展望について述べる。

参考文献

- [1] Blu-ray Disc Founders, "White paper Blu-ray Disc Format," 2004.
- [2] Blu-ray Disc Founders, "Blu-ray Disc Association Approves Final BDXL™ Format Specifications," 2010.
- [3] E. Nakasu, Y. Nishida, M. Maeda, M. Kanazawa, S. Yano, M. Sugawara, K. Mitani, K. Hamasaki, and Y. Nojiri, "Technical Development Toward Implementation of Ultra High-Definition TV System," SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.116, pp.279-286, 2007.
- [4] Y. Matsuo and S. Yano, "Converting Ultrahigh-Definition Video Into Digital Cinema by Using Time-Expanding Bi-Directional Motion Estimation and Higher Green Frequency," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.20, pp.65-75, 2010.
- [5] M. Sugawara, K. Masaoka, M. Emoto, Y. Matsuo, and Y. Nojiri, "Research on Human Factors in Ultrahigh-Definition Television (UHDTV) to Determine Its Specifications," SMPTE Motion Imaging Journal, Vol.116, pp.23-29, 2008.
- [6] M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, N. Ide, M. Furuki, M. Takeda, Y. Akiyama, T. Shimouma, and M. Yamamoto, "High-Density Near-Field Optical Disc Recording," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, pp.3537-3541, 2005.
- [7] K. Ueyanagi and T. Tomono, "Proposal of a Near-Field Optical Head Using a New Solid Immersion Mirror," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.39, pp.888-891, 2000.
- [8] J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film," Applied Physics Letters, Vol.73, pp.2078-2081, 1998.
- [9] J. Kim, I. Hwang, J. Bae, J. Lee, H. Park, I. Park, T. Kikukawa, N. Fukuzawa, T. Kobayashi, and J. Tominaga, "Bit Error Rate Characteristics of Write Once Read Many Super-Resolution Near Field Structure Disk," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, pp.1370-1373, 2006.
- [10] K. Nakai, M. Ohmaki, N. Takeshita, M. Shinoda, I. Hwang, Y. Lee, H. Zhao, J. Kim, B. Hyot, B. Andre, L. Poupinet, T. Shima, T. Nakano, and J. Tominaga, "First Playback of High-Definition Video Contents from Super-Resolution Near-Field Structure Optical Disc," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, 08KE02, 2010.
- [11] M. Ogasawara, K. Takahashi, M. Nakano, M. Inoue, A. Kosuda, and T. Kikukawa, "16 layers Write Once Disc with a Separated Guide Layer," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'10), Th-L-07, 2010.
- [12] M. J. Booth, M. Schwertner, T. Wilson, M. Nakano, and Y. Kawata, "Aberration Correction for the Writing and Read-Out of Multi-Layer Optical Memory," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'05), MC05, 2005.
- [13] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data," Science, Vol.265, pp.749-752, 1994.
- [14] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic Memories," Scientific American, Vol.273, pp.70-76, 1995.
- [15] J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage," IBM Journal of Research and Development, Vol.44, pp.341-368, 2000.

- [16] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic Data Storage Systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol.92, pp.1231-1280, 2004.
- [17] L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L. Schilling, M. G. Schnoes, and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage," *Optics Letters*, Vol.24, pp.487-489, 1999.
- [18] P. J. van Heerden, "A New Optical Method of Storing and Retrieving Information," *Applied Optics*, Vol.2, pp.387-392, 1963.
- [19] P. J. van Heerden, "Theory of Optical Information Storage in Solids," *Applied Optics*, Vol.2, pp.393-400, 1963.
- [20] K. E. Anderson, "Engineering the 300 GB HDS Disk & Drive," *Technical Digest of Optical Data Storage (ODS'09)*, TuC1, 2009.
- [21] Y. Kaneko, N. Kitazaki, J. Li, X. Tan, H. Narumi, M. Kinoshita, K. Suzuki, H. Horimai, S. Satoh, and H. Sasaki, "High Density Recording of Collinear Holographic Data Storage," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'05)*, MP22, 2005.
- [22] 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 Optical Data Storage (ODS'09)*, TuC3, 2009.
- [23] U.-S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, and J. Shamir, "Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer," *Applied Optics*, Vol.34, pp.846-853, 1995.
- [24] M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, P. Wimmer, and G. Wittmann, "A precision tester for studies of holographic optical storage materials and recording physics," *Applied Optics*, Vol.35, pp.2360-2374, 1996.
- [25] L. Hesselink, S. S. Orlov, A. Liu, A. Akella, D. Lande, and R. R. Neurgaonkar, "Photorefractive Materials for Nonvolatile Volume Holographic Data Storage," *Science*, Vol.282, pp.1089-1094, 1998.
- [26] 村上 浩介, "国立国会図書館のデジタルアーカイブ," *日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集*, 9pAS4, 2010.
- [27] 今中 良一, 湊 小太郎, "医療用ストレージと光ディスク," *日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集*, 9pAS5, 2010.

第2章 角度多重ホログラフィックメモリと記録密度向上の指針

2.1 緒言

ホログラフィーの原理 [1,2] を利用した光メモリの最も大きな特徴のひとつは、記録媒体のある体積中に情報を重ね書き、すなわち多重記録できることである。多重記録が可能であるがゆえに従来の光ディスクよりも高密度・大容量化が可能とされている。本章では、ホログラフィーの原理とそれに基づく様々な多重方式について述べ、角度多重方式を用いたホログラフィックメモリの他方式に対する得失を挙げる。さらに、具体的な記録再生装置の構成法および、記録密度を高めるための指針を考察する。

2.2 ホログラフィックメモリと多重方式

2.2.1 波動方程式と光波の表現

ホログラフィックメモリ [3-7] はレーザーなどの単色かつコヒーレントな光源を用いるため、ここでは光を扱う上で不可欠な波動方程式と光波の表現について述べる。本節で導出する数式表現は第3章の記録再生シミュレータ構成に必要な要素となる。

光は電磁波の一種であるため、その性質は Maxwell の方程式によって記述される。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

ここで、 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} はそれぞれ電場、電束密度、磁場、磁束密度を表し、 \mathbf{j} 、 ρ は電流密度、電荷密度である。媒質は等方かつ非分散とし、媒質中での誘電率を ε 、透磁率を μ 、電導率を σ とすると、次の構成方程式が成り立つ。

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

真空中や空气中、非導電材料中では ρ と \mathbf{j} を零として差し支えない。式 (2.3) の両辺の rotation をとり、ベクトルの公式 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ と式 (2.1)、式 (2.4) および構成方程式を用いれば、電場に関する波動方程式が得られる。

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

同様に、磁場に関する波動方程式は次式のように得られる。

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

また、式 (2.3) と磁場 \mathbf{H} のスカラー積、式 (2.4) と電場 \mathbf{E} のスカラー積との差をとり、ベクトル公式 $\mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H})$ を適用すると、エネルギー保存則

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) - \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \quad (2.10)$$

が得られる。特に $\mathbf{j} = 0$ の場合、電磁場の持つエネルギーの時間変化が $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ の発散に比例し、エネルギーが $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ の方向に伝搬することを意味している。このベクトル

$$\mathbf{S} \equiv \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.11)$$

はポインティング・ベクトルと呼ばれ、単位時間あたり、それに直交する単位面積を横切って伝搬するエネルギーを表す。

今、角周波数 ω の光波を考える． \mathbf{A} は \mathbf{E} または \mathbf{H} を表すこととすれば、光波は

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) \exp \{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi)\} \quad (2.12)$$

と記述できる．ここで、 \mathbf{k} 、 \mathbf{r} は波数ベクトルと位置ベクトル、 \mathbf{A}_0 は位置 \mathbf{r} での振幅ベクトル、 φ は初期位相である．光速を c とし、これらを波動方程式に代入すると、

$$\nabla^2 \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.13)$$

となり、時間に依存しない微分方程式として表される．この方程式はヘルムホルツの方程式と呼ばれる．

光波は常に \mathbf{E} と \mathbf{H} の組み合わせとして表されるが、等方・非分散の媒質中でこれらは同一の位相をもち振幅比も一定であるため、どちらか一方のみで表現することが可能である．簡便のため、伝搬方向に垂直な平面内に含まれる直線偏光かつ単色(単一周波数 ω) の平面波として考え、その偏光方向のみの振幅 A_0 のスカラー波として扱うと光波を次式のように表現できる．

$$A(\mathbf{r}, t) = A_0(\mathbf{r}) \exp \{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi)\} \equiv U_0(\mathbf{r}) \exp(i\omega t) \quad (2.14)$$

特に、 $U_0(\mathbf{r}) = A_0(\mathbf{r}) \exp \{j(-\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi)\}$ は場所ごとの位相を伴った振幅と解釈でき、複素振幅と呼ぶ．時間分解計測など極短時間の観測でない限り、一般的な光の検知には光波の振動周期よりも十分長い観測時間 τ_0 を要するため、測定される光波エネルギー P はポインティング・ベクトルの時間平均値となり、

$$P = |\mathbf{E}_0||\mathbf{H}_0| \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \cos^2(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi) dt = \frac{|\mathbf{E}_0||\mathbf{H}_0|}{2} = \frac{|\mathbf{E}_0|^2}{2\mu c} \quad (2.15)$$

で表される．ここで c は真空中の光速 c_0 と媒質中の屈折率 n を用いて $c = c_0/n$ である．一様媒質中の相対的なエネルギー分布を問題にする場合、比例定数を省略し、

$$P = |\mathbf{E}_0|^2 = |E_0|^2 = |U_0|^2 \quad (2.16)$$

と記述できる．ホログラムの特性を調べる際、入射光エネルギーに対する回折光エネルギーの割合が重要な役割を果たす．この割合を回折効率と呼び、記録されたホログラムの強さと密接な関係がある．

2.2.2 ホログラフィーの原理

元来ホログラフィーは立体写真技術であり，被写体からホログラム媒体へ照射される光の強度と位相の両方を記録・保持できる特徴がある．ホログラフィーを再生する場合も，記録したときと同じ強度分布と位相分布の光が得られるので，その波面を観測するとあたかも被写体があるかのような立体像が得られる．

Figure 2.1(a) にホログラフィーの記録の原理を示す．光源にはコヒーレンス長が長いレーザーなどを用いる必要がある．レーザービームをハーフミラーで二つに分離し，一つは被写体へ照射することで物体光を得る．もう一つは参照光として物体光と同時にホログラム記録媒体へ照射させる．このとき，参照光と物体光との間で光の干渉による干渉縞がホログラム媒体中に生じる．参照光を物体光と同じ側から記録媒体へ照射するものを透過型ホログラム，逆側から照射するものを反射型ホログラムと呼ぶ．参照光 $R(\mathbf{r}, t)$ と信号光 $S(\mathbf{r}, t)$ をそれぞれスカラー波で表すと

$$R(\mathbf{r}, t) = R_0 \exp \{j(\omega_r t - \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} + \varphi_r)\} \quad (2.17)$$

$$S(\mathbf{r}, t) = S_0 \exp \{j(\omega_s t - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r} + \varphi_s)\} \quad (2.18)$$

のように記述できる．これら 2 つの波が重なって形成される干渉縞の強度分布 $I(\mathbf{r}, t)$ は

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= |R(\mathbf{r}, t) + S(\mathbf{r}, t)|^2 \\ &= |R(\mathbf{r}, t)|^2 + |S(\mathbf{r}, t)|^2 + R(\mathbf{r}, t)S^*(\mathbf{r}, t) + S(\mathbf{r}, t)R^*(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (2.19)$$

と表せる．ここで* は複素共役を表す．さらに展開すると，

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= |R(\mathbf{r}, t)|^2 + |S(\mathbf{r}, t)|^2 \\ &\quad + R_0 S_0 \exp [j\{(\omega_r - \omega_s)t - (\mathbf{k}_r - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_r - \varphi_s)\}] \\ &\quad + R_0 S_0 \exp [j\{(\omega_s - \omega_r)t - (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_r) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_s - \varphi_r)\}] \\ &= R_0^2 + S_0^2 + 2R_0 S_0 \cos [j\{(\omega_r - \omega_s)t - (\mathbf{k}_r - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_r - \varphi_s)\}] \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる．参照光，物体光とも同一波長 (同一角周波数，すなわち $\omega_r = \omega_s$) の場合，干渉縞の強度分布は時間に依存せず，位置 \mathbf{r} に対して余弦波状に変化する分布となる．位

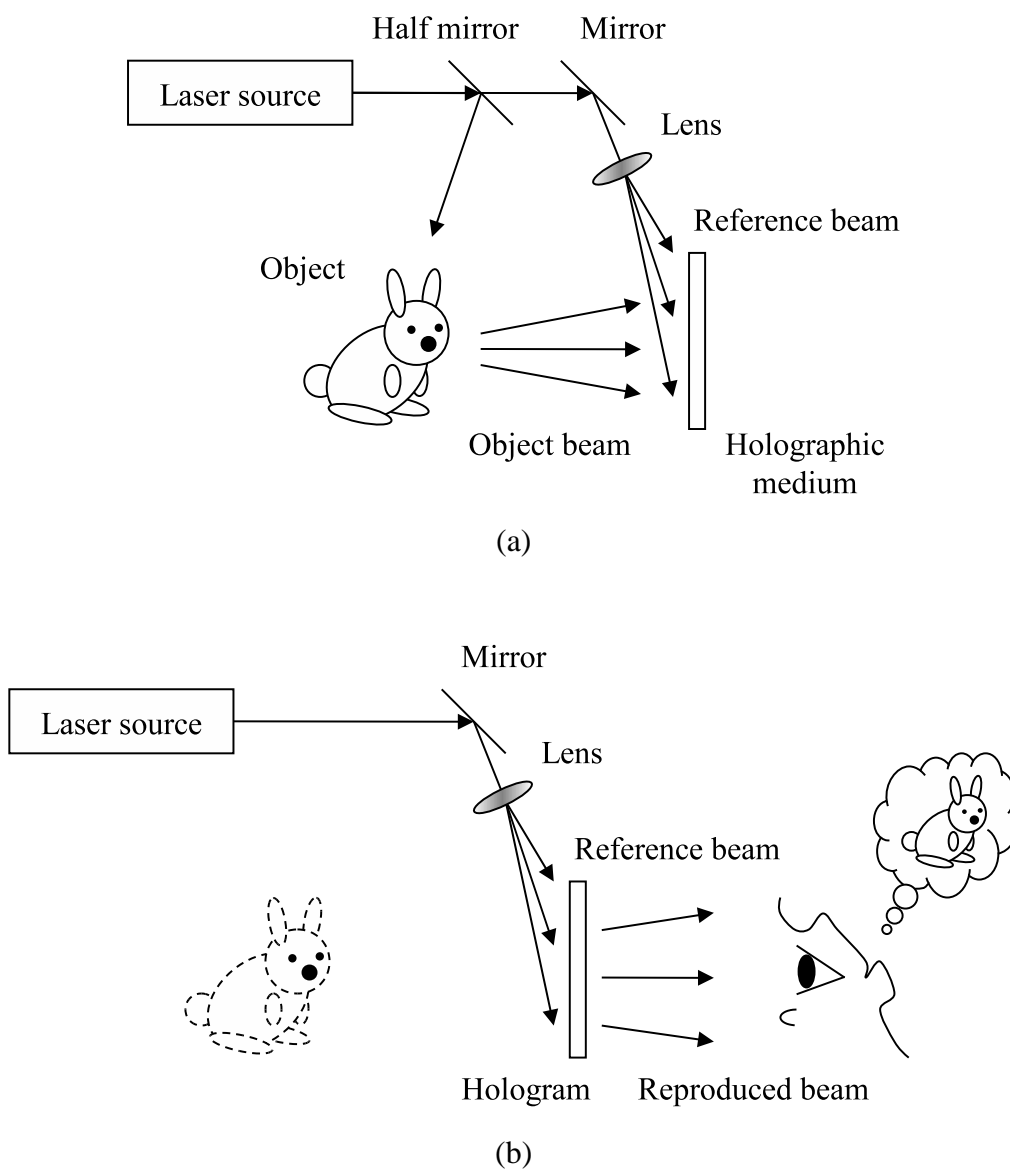


Fig. 2.1 Principle of holography in (a) recording and (b) reproducing wavefront.

相差の項を省略して記述すれば，

$$I(\mathbf{r}) = R_0^2 + S_0^2 + 2R_0S_0 \cos \{j(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_r) \cdot \mathbf{r}\} \quad (2.21)$$

となる．

干渉縞は光の強弱であるから，媒体中で光強度に応じた反応を誘起し，これを保持したものがホログラムとなる．媒体の材料にも依存するが，光強度に応じた反応とは一般的に透過率の変化や屈折率の変化，分極などである．例えば，式(2.21)で表される干渉縞強度分布に応じた透過率変化が記録媒体中にホログラムとして保持された場合を考える．これは振幅ホログラムと呼ばれ，銀塩乳剤などを記録材料とする写真乾板でホログラフィーを実現する方法としてホログラフィー発展の初期の頃から用いられてきた．透過率振幅が光強度に比例して変化するとしたとき，媒体の透過率分布は

$$Trans(\mathbf{r}) = Trans_0 + Trans_1 I(\mathbf{r}) \quad (2.22)$$

と記述できる． $Trans_0$ は基準となる透過率を表す．写真技術と同様，ネガティブとポジティブが透過率変調度 $Trans_1$ の負，正に対応する．

Figure 2.1(b) はホログラフィーの再生の原理である．記録したときと同じ条件で参照光をホログラムに照射することで，保持された干渉縞パターンにて光の回折が生じ，強めあう条件でのみ回折波が観測者に到達する．

式(2.17)で表される参照光 $R(\mathbf{r}, t)$ を式(2.22)の透過率分布を有するホログラムへ照射すると，ホログラムを通過した直後の光波振幅分布 $D(\mathbf{r}, t)$ は式(2.19)より

$$\begin{aligned} D(\mathbf{r}, t) &= R(\mathbf{r}, t) Trans(\mathbf{r}) = R(\mathbf{r}, t) \{Trans_0 + Trans_1 I(\mathbf{r})\} \\ &= R(\mathbf{r}, t) \left[Trans_0 + Trans_1 \left\{ R_0^2 + S_0^2 \right\} \right] \\ &\quad + R(\mathbf{r}, t) Trans_1 R(\mathbf{r}, t) S^*(\mathbf{r}, t) + R(\mathbf{r}, t) Trans_1 S(\mathbf{r}, t) R^*(\mathbf{r}, t) \\ &= R(\mathbf{r}, t) \left[Trans_0 + Trans_1 \left\{ R_0^2 + S_0^2 \right\} \right] + Trans_1 R^2(\mathbf{r}, t) S^*(\mathbf{r}, t) + Trans_1 R_0^2 S(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (2.23)$$

と表される．右辺第1項はホログラムを直進して透過する参照光，第2項は高次回折光，第3項は物体光と同一波面を有する回折光すなわちホログラム再生像を示しており，これによりあたかも被写体がそこに存在するかのよう観察できる．

2.2.3 ホログラフィックメモリ

前項では立体写真撮影技術としてのホログラフィーについて述べた。ここでは、同一の原理を利用するホログラフィックメモリの基本的構成について述べる。

情報記録時と再生時におけるホログラフィックメモリの基本的構成を Fig. 2.2(a), (b) にそれぞれ示す。レーザービームをハーフミラーで参照光と信号光の二つに分離する。記録時、記録すべきデジタル情報はページデータ (data page) と呼ばれる二次元配列に変換される。最も基本的なページデータの構成は情報ビットの '1' を白の画素、'0' を黒の画素として表現する NRZ(non-return to zero) 符号である。また、例えば隣接する 2 画素の一方が他方より高輝度とすることで 1 ビットを表現する 1:2 符号、 2×2 画素からなる画素ブロックのうち 1 画素を他よりも高輝度とすることで 2 ビットを表現する 2:4 符号、さらには 4×4 画素からなる画素ブロックのうち 3 画素を他よりも高輝度とすることで 9 ビットを表現する 9:16 符号などが用いられる [8,9]。これらの符号は NRZ 符号よりも符号化効率は低くなるが、ノイズの多い光学システムにおいてはノイズ耐性の点で有利である。逆に、ノイズの少ない光学システムにおいては、画素の輝度値に中間調を用いる多値変調が可能となる [10]。例えば 1 画素が 256 階調で表現される場合、画素の輝度値を 0, 63, 127, 255 の 4 値から選択することで 1 画素に 2 ビットを割り当てることができる。多値変調は NRZ 符号よりも符号化効率が高いため、ホログラフィックメモリにおける記録密度、転送速度の両面で有効な方法であるが、わずかな輝度変化によりビット誤りを生じるためノイズ耐性は低い。

これら符号化により、記録すべき情報は一枚の画像として SLM に送られる。SLM はページデータを表示する対角 1 inch 程度のディスプレイであり、反射型 SLM として DMD(digital micromirror device)、反射型および透過型 SLM として液晶パネルが用いられる。信号光は SLM により空間的に強度変調され、記録媒体へ照射される。このとき同時に参照光を記録媒体へ照射することで媒体内部に干渉縞すなわち光の強弱が生じ、この強弱分布をホログラムとして保持する。

ホログラフィーのような写真技術と異なり、ホログラフィックメモリは体積内にホログラムを多重記録する必要があるため、必然的に厚い記録媒体を用い、高多重数・高密度記録を実現しなければならない。また、式 (2.22) で表したような振幅変調ではなく、位相変調すなわち場所ごとに屈折率が異なる形態でホログラムを保持する。これを実現する記録媒体として、古くは LiNbO_3 や LiTaO_3 などのフォトリフラクティブ

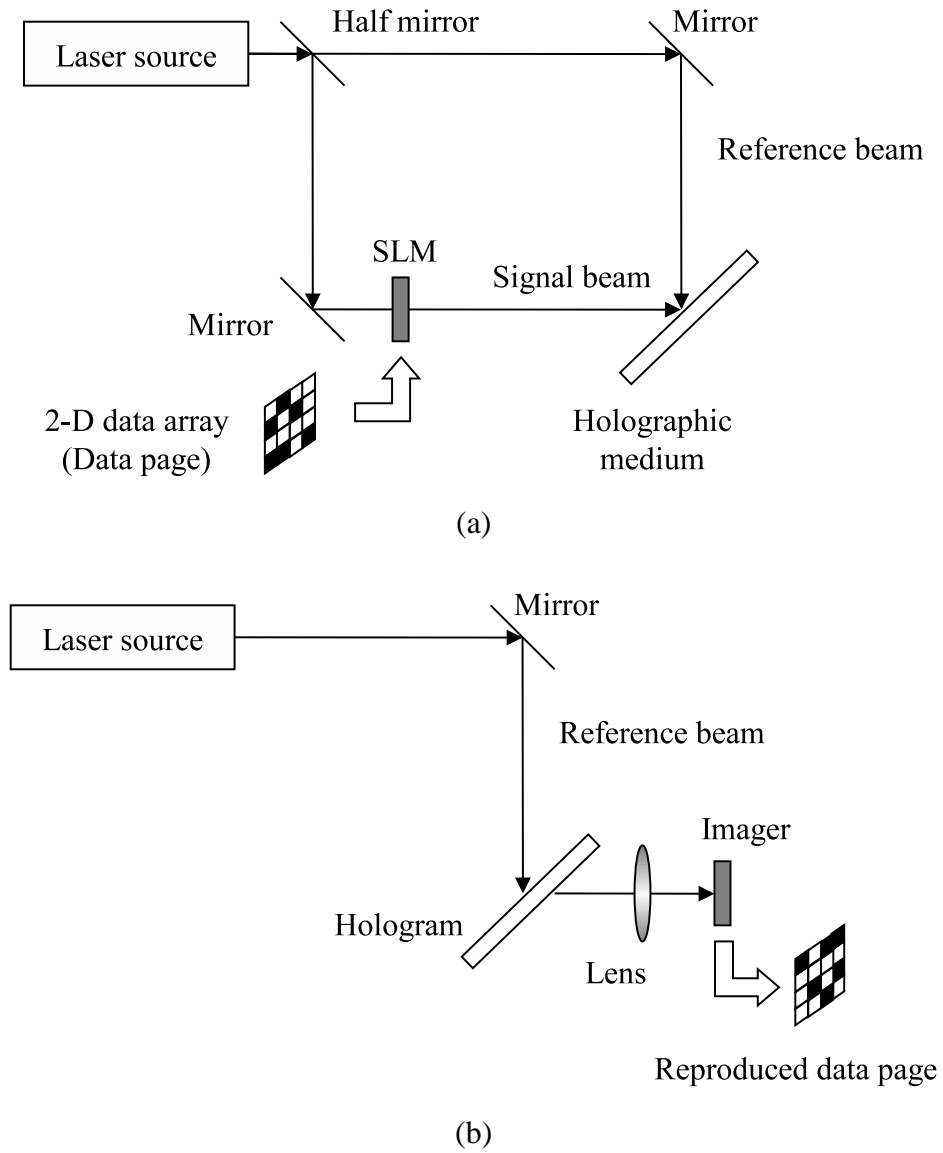


Fig. 2.2 Schematic diagram of fundamental holographic memory for (a) recording and (b) reproducing data page. SLM stands for spatial light modulator.

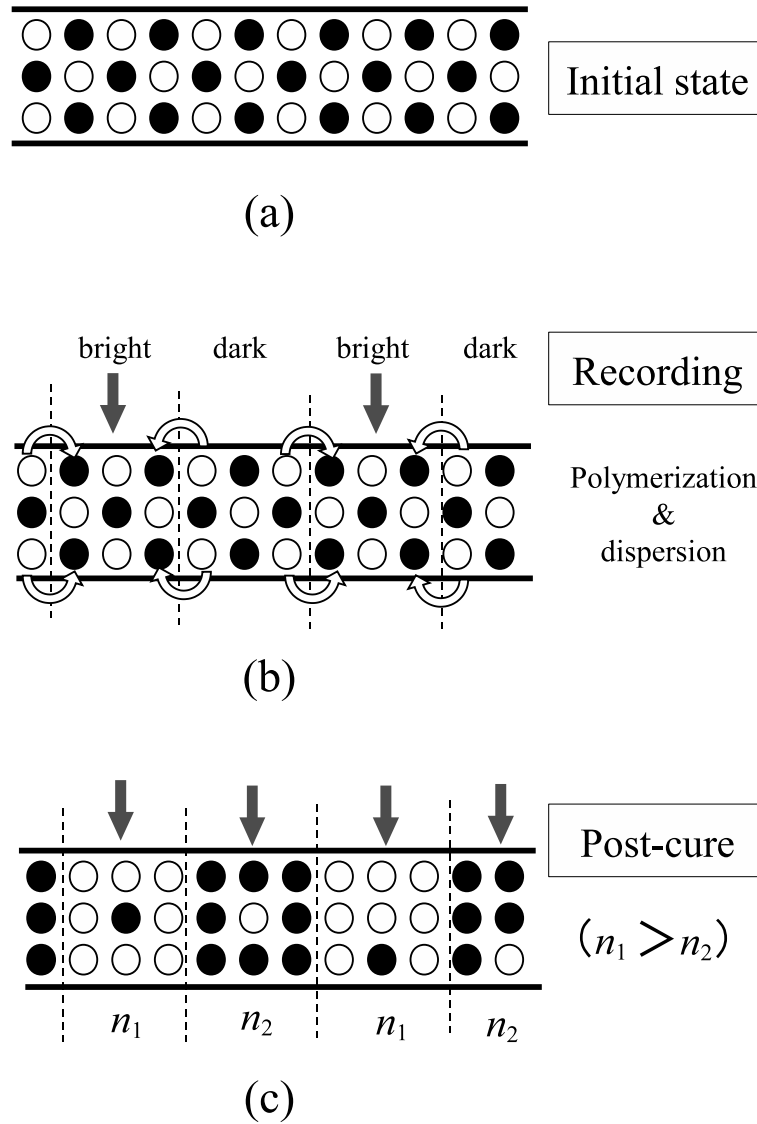
結晶が用いられてきた [11, 12] . フトリフラクティブ結晶の欠点は光照射により既記録済みのホログラムが次第に消去されていく点にあり, 再生時に読み出し用参照光を照射するだけでも消去されてしまう. これを解決する方法として, 結晶に鉄 (Fe) やルテニウム (Ru) などの不純物をドーブし, バンドギャップ内に準位を形成することで特定の波長の光により容易に消去されない工夫が考案されている [13, 14] . とはいえ, この場合でもデータの寿命は長くて数年程度と言われている .

1990 年代後半に, 米国のプロジェクトによりホログラフィックメモリのための優れたフォトポリマー材料が開発された [15] . 光重合開始剤, バインダー, モノマー, 重合反応停止剤などからなる材料であり, 光を照射することでモノマーが重合反応する . 特に屈折率の異なる 2 種類のモノマーを含有した 2-chemistry と呼ばれる材料 [16, 17] は, 光の強弱を安定した屈折率分布として保持するのに適している . ホログラムが屈折率分布として形成・保存される仕組みを Fig. 2.3 に示す .

Figure 2.3(a) に示すように, 記録前の初期状態では屈折率の異なるモノマーが均一に分布している . 参照光と信号光の同時照射によって生じる光の干渉縞により, 光の強い部分は弱い部分に比べて重合反応が進行する . 移動を伴うモノマーの重合反応 (polymerization) により場所ごとの屈折率分布が形成される (Fig. 2.3(b)) . 情報記録の完了後には flood cure または post cure と呼ばれる非コヒーレント光照射により残留モノマーを全て反応させることで, 以後反応が進行しないように定着させる (Fig. 2.3(c)) . 重合による分子の結合は, 高温加熱あるいは紫外線照射など行わない限り切れにくい . ため, 長期間に渡り安定に保持される . この性質からホログラフィックメモリの長期保存が可能となる .

再生時には参照光のみを記録媒体へ照射する . ホログラムにより光の回折を生じ, これらが強め合う条件 (Bragg の回折条件) で再生光が得られるので, これを結像レンズを通じて撮像素子により撮影し, 再生画像から元の情報を復元する .

ホログラフィックメモリは, 多数のビット情報を含んだ 1 枚のページデータを 1 度の光照射により書き込みあるいは読み出しできるため, 他の光メモリに比べ高転送速度化に有利である . また, 複数のページデータを記録媒体の同一箇所を重ね書き (多重記録) できるため, 高密度・大容量化にも有利である . 多重記録方式としては様々な方法が提案されており, 次項でそれらの詳細について述べる .



- : High polymerizability, high refractive index
 ● : Low polymerizability, low refractive index

Fig. 2.3 Mechanism to record a hologram in a photopolymer material. When an interference fringe pattern is irradiated to (a) initial state material, (b) high and low refractive indices pattern is formed, and then are maintained for long time after (c) fixing by post-processing.

2.2.4 多重記録方式

1つのページデータが媒体にホログラムとして記録されている場合、読み出し参照光の照射条件が記録時と一致しているときのみ Bragg の回折条件を満足し、正確に再生光が得られる。逆に言えば、参照光の照射条件が記録時から外れるに従い Bragg の回折条件を満たさなくなり、徐々に再生光が得られなくなる。ページデータの再生光が得られなくなる参照光照射条件を用いて、既に記録されたホログラムと同一箇所に別のページデータを重ね書きできる。これが多重記録の基本原理である。

ホログラフィックメモリにおける多重記録方式は、これまで様々な手法が考案されている [5,6,18]。ここでは主な多重記録方式と、多重記録に付随した再生光学系技術について述べる。

Figure 2.4 は、様々な多重記録方式の概念図を示している。いずれも参照光の照射条件を変化させながら多数のページデータを多重記録するものである。Figure 2.2 ではページデータで変調された信号光が媒体まで空間伝搬するフレネル型ホログラムを示していたが、ホログラフィックメモリの場合、一般的には信号光をフーリエ変換レンズ (FTL : Fourier-transform lens) により絞り込み、記録媒体の微小領域に照射することで記録密度を高めるフーリエ変換型ホログラムが採用される [6]。

Figure 2.4(a) 角度多重 [19–21] では媒体への参照光の入射角度を変化させる。1つのホログラムが Bragg の回折条件を満足する参照光角度から徐々に角度変化させると回折光強度が低下する。角度変位に対する回折光強度をプロットしたものを角度選択曲線と呼び、その曲線の鋭さを角度選択性と呼ぶ。参照光として一般的に単純な平面波を用いる。この場合、異なる記録装置間での互換性が高く、構成も比較的容易となる。参照光角度そのものを信号光軸に対して走査する方法のほか、記録媒体の傾斜角度を変えることにより相対的な参照光角度を変化させる方法がある。

Figure 2.4(b) ペリストロフィック多重 [22] は記録媒体をその面内方向に回転させる。または参照光入射方向を相対的に変化させる。角度多重に類似しているが、面内方向の角度選択性が低いためペリストロフィック多重を単独で用いた場合、高記録密度の達成が困難であり、他の多重方式と併用されることが多い。

Figure 2.4(c) 球面シフト多重 [23] は参照光として球面波を用いる。記録媒体の位置をシフトさせると記録時の参照光の球面状波面と合致しなくなることから別のホログラムを多重記録することができる。参照光軸にレンズを配置することで容易に構成で

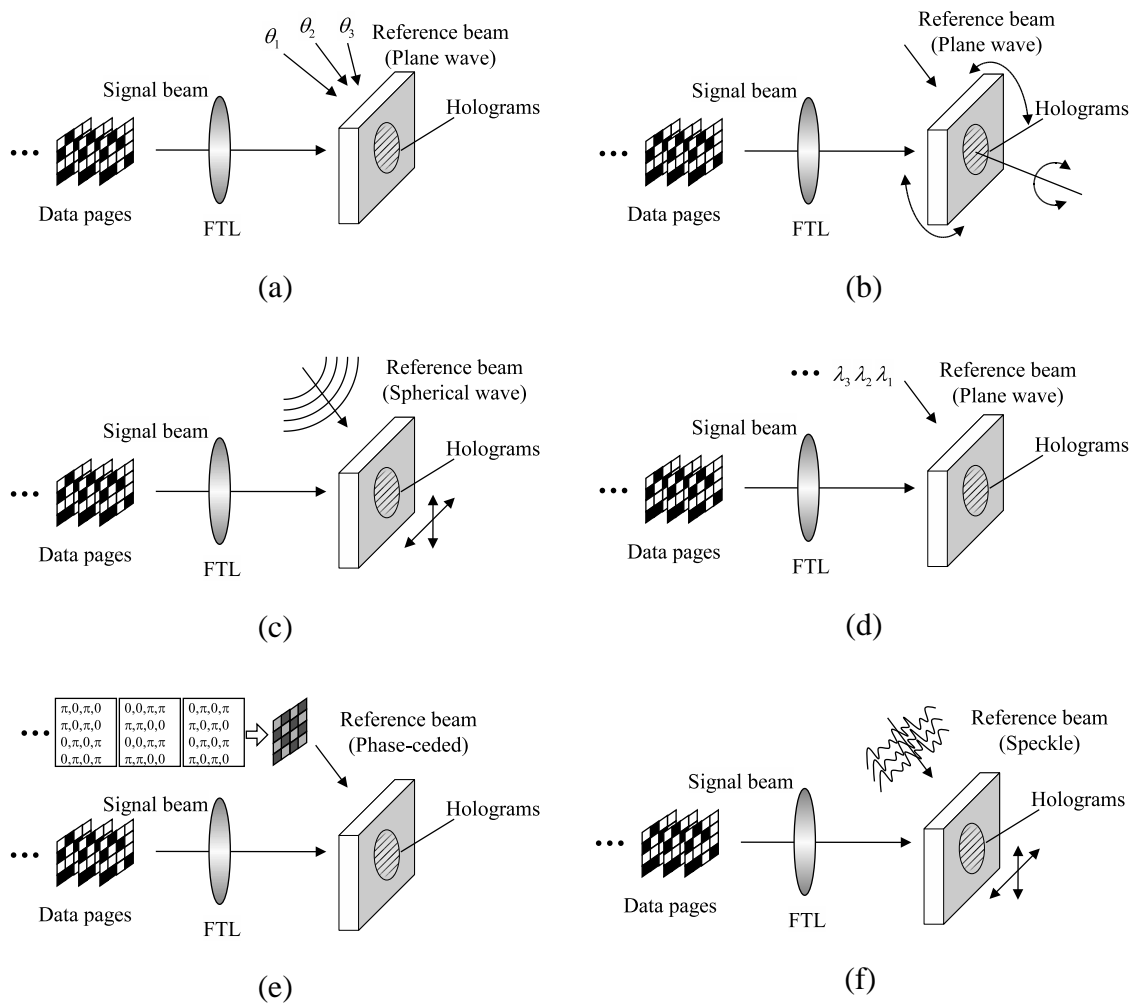


Fig. 2.4 Various multiplexing methods in Fourier-transform type holographic memory : (a) angle, (b) peristrofoc, (c) spherical shift, (d) wavelength, (e) phase-code, and (f) speckle shift. FTL stands for Fourier transform lens.

きるが、位置シフトに関する選択性(位置選択性)は後述するスペックルシフト多重ほど高くなく、記録密度の点で有利とはいえない。また、媒体位置シフトと参照光入射角度変化が独立でないため、角度多重との併用は困難である。

Figure 2.4(d) 波長多重 [24] は光源の波長を変化させながら多重記録する方式である。波長を変化させることにより干渉縞の間隔が変化する。これにより Bragg の回折条件からずれた波長で別のホログラムを記録する。波長可変のレーザー光源を要するため、コストの面で課題がある。

Figure 2.4(e) 位相コード多重 [25–27] は参照光軸上に位相変調用の SLM を設置することで参照光波面の位相を空間的に変化させる。位相変調用 SLM は使用波長におい

Table 2.1 Advantages and disadvantages for various multiplexing methods.

	Angle multiplexing	Peristrophic multiplexing	Spherical shift multiplexing	Speckle shift multiplexing	Phase-code multiplexing	Wavelength multiplexing
Multiplexing number		×			×	
Required mechanical precision				×	×	
Cost of equipment						×
Tolerance disturbance					×	

て各画素の位相を $0, \pi$ と変えることができる。単独画素からなる参照光は位相コードとして機能しないが、位相の異なる複数画素で構成された参照光は一意的な波面となる。自己相関が高くまた別の波面との相互相関がほぼ零となるような直交行列を採用し、これにより構成された位相コードを位相変調用 SLM に表示することで、ホログラム間のクロストークを低減することができる。しかしながら、参照光軸のアライメントや位相変調 SLM - 記録媒体間に精密な位置調整を要することから、機構部に高い精度が要求され、振動などの外乱に対する対応策が課題となる。

Figure 2.4(f) スペックルシフト多重 [28–30] は参照光の波面をランダムな位相により空間変調する。ランダムな波面は位置シフトさせたものとの相互相関が極めて低く、位置シフト選択性が高い。わずかな位置シフトピッチでホログラムを多重することができるため、記録密度の点で有利である。また、すりガラスなどを用いることでランダムな波面を容易に生成できる特徴がある。あるいは(e)位相コードの位相を $0, \pi$ ではなくランダム位相とすることでも擬似ランダム (pseudo-random) な波面が得られる。また、ランダム位相の生成に一意的な位相マスク (RPM : random phase mask) を使い、これをキーとする暗号化手法も提案されている [31–33]。再生には記録時に用いた RPM が無ければ正しい情報が得られないことから、光学的に暗号化をかけることができ、頑健なセキュリティ用途に適する応用が考えられる。一方、位相コード多重と同様、参照光軸のアライメントや RPM - 記録媒体間の精密な位置調整などが課題として残る。

上記のとおり各多重記録方式の得失を表にまとめると Table 2.1 のように表せる。これらは単独で用いられるほか、幾つかを併用して用いることで記録密度の向上を図ることも提案されている [34–39]。列挙した多重方式の中では要求される機械精度と擾乱・外乱への耐性、装置コストの点で角度多重方式が有利である。しかしながら多重数が角度選択性と参照光角度の可変範囲で制限されるため、従来の角度多重のみでは

記録密度の向上が困難であった。一方、スペックルシフト多重方式はその極めて高い位置シフト選択性から、隣接するホログラムの位置間隔を数 μm にすることもできるため、単位体積あたりの多重数が極めて高く、記録密度の点で有利である。しかし逆に、記録再生系の機構部に高い精度が要求され、振動などの外乱に対する対応策が必要となる。

いずれの多重方式も一長一短があるが、短所を補うためのシステム構成上重要な光学的手法が幾つか提案されており、これについて次に述べる。

Figure 2.5(a) はポリティック多重 [40] または開口多重 [41] と呼ばれる手法であり、位置シフト多重以外の方式（例えば角度多重方式）と併用される。つまり、位置シフト選択性を有していない多重方式に位置シフト選択性を与えることで記録密度向上を図るものである。ホログラムからの再生光が収束したビームウエスト位置に矩形開口を設ける [7, 40]。記録媒体上のホログラムサイズよりも小さなピッチで位置シフト方向に重ね書きし、これをホログラムサイズよりも大きなビーム径の参照光で読み出した場合でも、隣接するホログラムからの再生光は矩形開口を通過できず、所望のホログラムからのみ光を取り出すことができる。角度多重方式と併用した場合、角度多重される情報がページデータと呼ばれていることに因んで、一つのホログラム領域をブックと呼ぶ [42]。ブックの位置シフト間隔は矩形開口の大きさまで狭くしてもクロストークを生じない。従って、矩形開口の大きさを小さくすることが記録密度向上の鍵となる。

Figure 2.5(b) は球面シフト多重方式やスペックルシフト多重方式、位相コード多重方式などの光学系を簡素化するために用いられる光学配置であり、一つのレンズを信号光と参照光の両方で併用することができる。実際のデモンストレーション例として、ページデータを挟む両側にランダム位相マスクを配置した Orlov [28] らの報告や、ページデータ形状を円形とし、その外周部を参照光として用いる報告 [43, 44] が知られている。光学系の簡素化は必ずしも記録密度を向上させるとは限らないが、記録再生時の機構系制御が容易になるためシーク時間短縮と高転送速度化に寄与でき、また単一レンズのみで記録媒体へアクセスできる場合は CD や DVD, BD など従来の光メモリと互換性を確保しやすい利点がある。また、角度多重方式においても信号光と参照光を一つのレンズにより媒体へ照射するモノキュラー光学系が近年報告されている [45]。

Figure 2.5(c) は、記録時とは位相分布が共役な参照光（位相共役光）を再生時に照射するもので位相共役再生と呼ばれる [7, 46]。参照光として平面波を用いる角度多重方

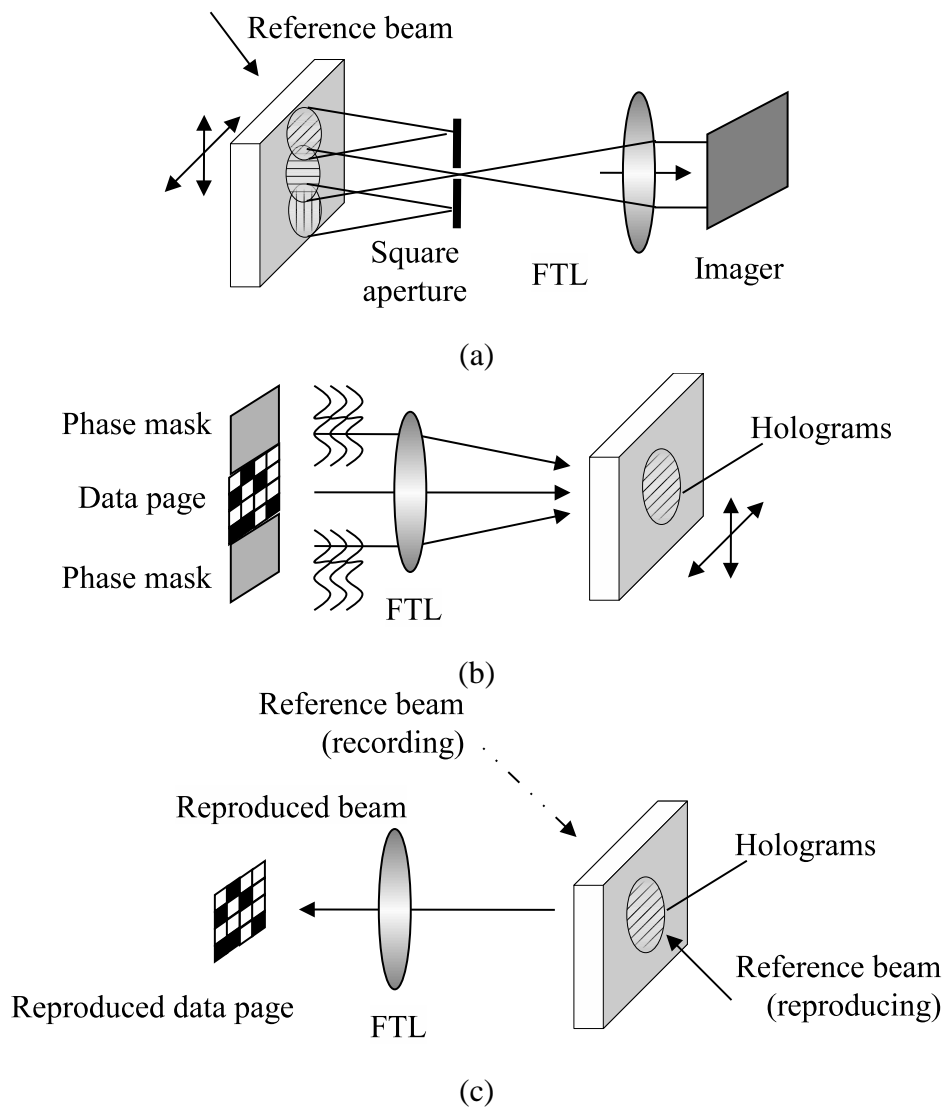


Fig. 2.5 Configurations related to optical system in holographic memory : (a) polytopic multiplexing, (b) co-axial configuration, and (c) phase-conjugation reproduction.

式，ペリストロフィック多重方式，波長多重方式においては位相共役光を比較的容易に作り出すことができ，一般的には記録時と正反対の方向から記録媒体へ平面波を照射させるだけでよい．位相共役再生の最大の利点は，信号光がFTLなどの光学系を通過する際に重畳される収差を，再生時に打ち消すことができ，収差に起因する再生信号品質の劣化を除去できる点にある．Figure 2.6(a)に示すとおり，収差をもつ光学系を信号光が通過し，その波面がホログラムとして記録媒体に保持されている場合を考える．記録時と同一の参照光を再生時にホログラムへ照射した場合，Fig. 2.6(b)のように収差を含んだままの再生光が得られ，信号品質は低下する．一方，位相共役光を参照光としてホログラムへ照射すると，その再生光は収差を位相共役の形態で有する波面となる．Figure 2.6(c)に示すとおり，記録時と同一の収差を有する経路を再生光が逆進することで，収差を打ち消すことができる．

さて，あるページデータの再生光が得られなくなるよう参照光照射条件を変えて，別のページデータを重ね書きすることが，全ての多重記録方式における基本原理であることを既に述べた．高密度に記録するためには，参照光照射条件の変化量を小さくし，多重数を増加させることが必要となる．しかしながら，参照光照射条件の変化量を小さく多重記録した場合，隣接するページデータがクロストークとして所望のページデータに重畳され，再生信号品質の劣化ひいてはビット誤りの増大を招く．すなわち，記録密度・多重数の向上と高信号品質・低ビット誤り率はトレードオフの関係にあるため，ホログラフィックメモリの最大記録容量に制限を与えることになる．許容されるビット誤りまたは信号品質劣化の範囲内で，いかに記録密度を向上させるかがホログラフィックメモリでの重要な課題である．

本研究においては，ホログラフィックメモリの実用化に不可欠な要素となるシステムの安定性や機器互換性，要求される機械精度の実現性を鑑み，多重記録方式のうちTable 2.1に挙げた得失から角度多重方式に焦点を置く．角度多重方式の記録密度向上においても，上記のとおり許容クロストーク量の範囲内で隣接ページデータ間の参照光角度間隔を狭くする必要がある．さらなる記録密度向上のためには，従来提案されていない新たな手法が求められていた．そこで本論文では第4章以降で具体的な記録密度向上のための手法を提案し，その妥当性を検証する．

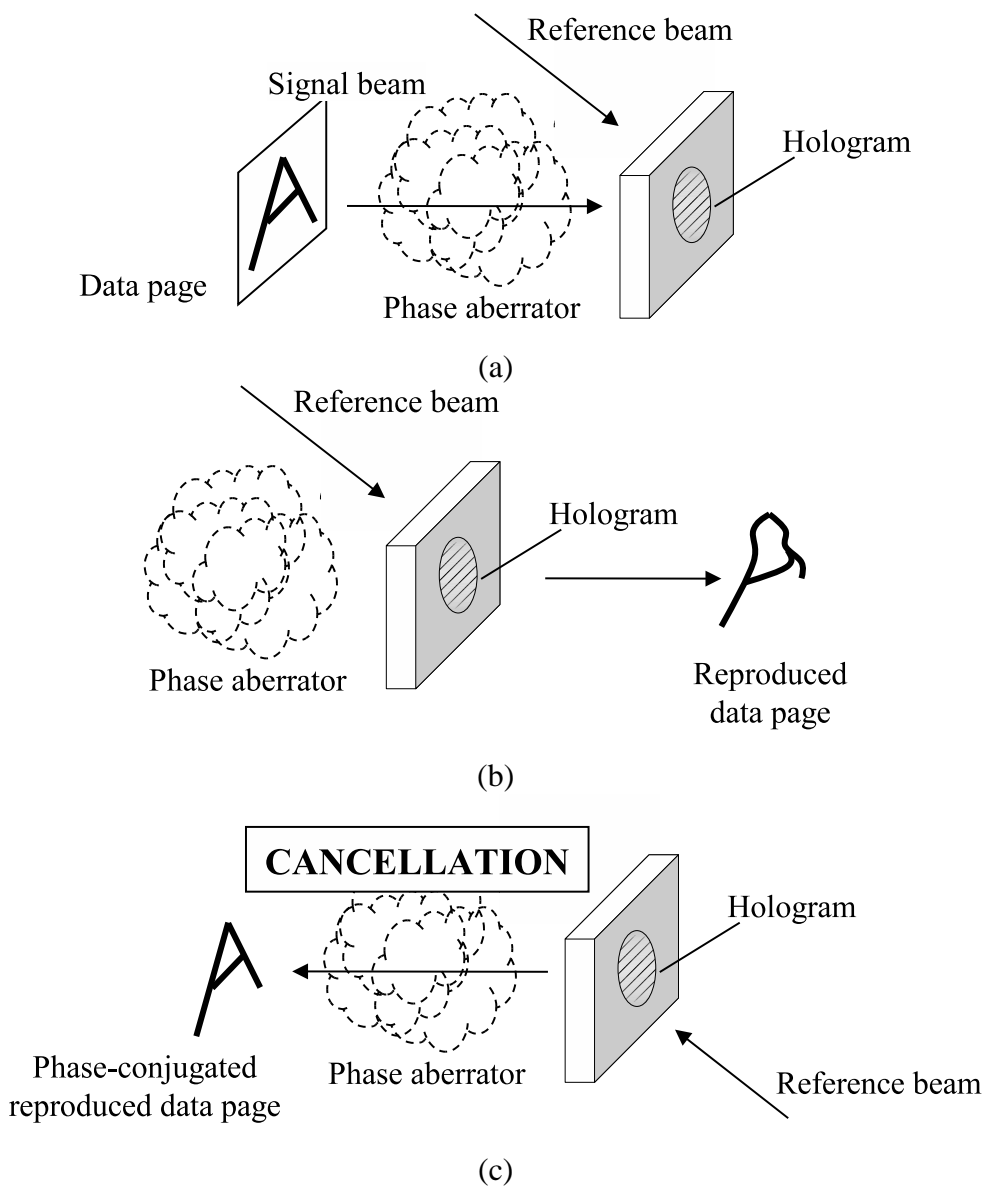


Fig. 2.6 Phase-conjugation reproduction : (a) a hologram recorded with a data page including phase aberration, (b) distorted and deteriorated data page reproduced by the same reference beam as used when recording, and (c) aberration cancellation by phase-conjugated reference beam illumination.

2.3 記録再生実験装置

第4章以降で述べる記録密度向上手法の妥当性を検証するために、角度多重ホログラフィックメモリ記録再生実験装置を構築した。また、角度多重方式と併用して位相共役再生によりレンズ系の収差を補償し、さらに媒体位置シフトに対する選択性を得るため開口多重も併用する。本節では、その構成法の詳細について述べる [47,48]。

2.2.4 項で述べたとおり、角度多重方式における参照光の入射角度を変更させる方法は2つある。参照光路中にビームの進行方向を変えるためのミラーを配置し、実際に参照光自体の光路を変える方法と、参照光と信号光を含む平面内において記録媒体自体を傾斜させることで参照光の入射角度を変える方法がある。ここでは後者すなわち記録媒体自体を傾斜させるものについて説明する。

Figure 2.7 は実験装置の光学配置図であり、(a) は記録時、(b) は再生時の光路を示している。また、Fig. 2.8 は光学系の写真である。光源として波長 532 nm、シングル縦モードの半導体励起固体 (DPSS : diode-pumped solid state) レーザーを用いた。レーザービームはスペイシャルフィルタにより空間的なノイズを除去したのちビーム径を拡大する。記録時には半波長板 (HWP : half-wave plate)¹ により偏光方向を回転させ、偏光ビームスプリッタ (PBS : polarizing beam splitter)¹ にて信号光と参照光に分離する際に、それぞれのパワー比が所望の値となるよう調整する。信号光はさらにビーム径を拡大し、ページデータの表示された SLM に照射される。SLM としては反射型の LCOS (liquid crystal on silicon)-SLM を用いた。画素数と画素ピッチはそれぞれ 1408×1058 と $10.4 \mu\text{m}$ である。

SLM に表示するページデータは 75264 bit からなり、2:4 符号にて変調されている (Fig. 2.9)。1 つの輝点ブロックは SLM 上の 3×3 pixel で表した。つまり、輝点ブロックのピッチは $31.2 \mu\text{m}$ である。信号光のうち S 偏光成分は FTL を通過後、不要な高次回折成分を除去するためフーリエ変換面に設置された開口を通過し、0 次回折成分のみが記録媒体に照射される。開口の形状は円形 [49] や十字形 [50] などが提案されているが、ここでは矩形開口 [7] を用いた。FTL の焦点距離は 28.2 mm であり、矩形開口の一辺の大きさはナイキスト空間周波数のおよそ 2.0 倍となる 1 mm とした。信号光の DC 成分の局所的な集中を避けるため、記録媒体をフーリエ変換面から離して配置した。参照光は記録時に FTL 側から S 偏光で媒体へ照射される。

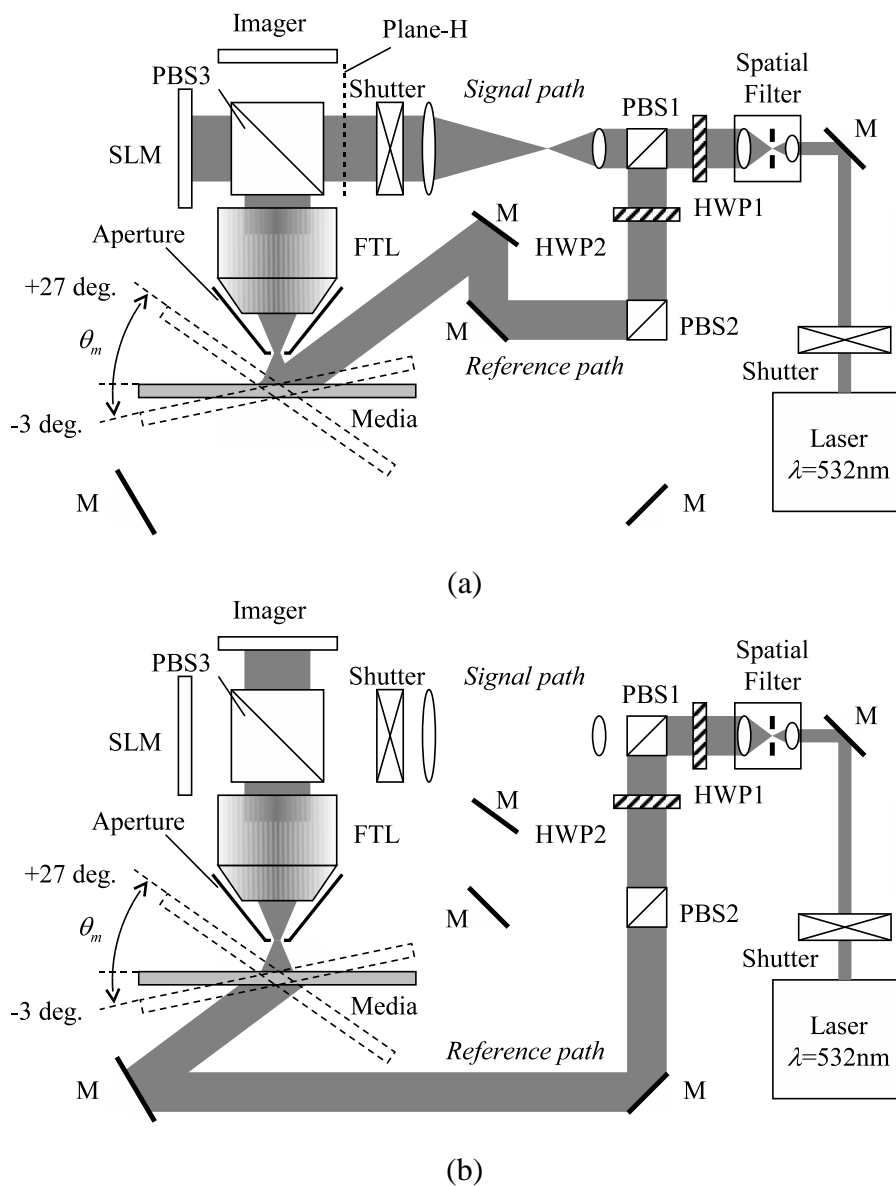


Fig. 2.7 Schematic diagram of angle-multiplexed holographic memory experimental setup for (a) recording and (b) reproducing data pages. M, PBS, and HWP stand for mirror, polarizing beam splitter, and half-wave plate, respectively.

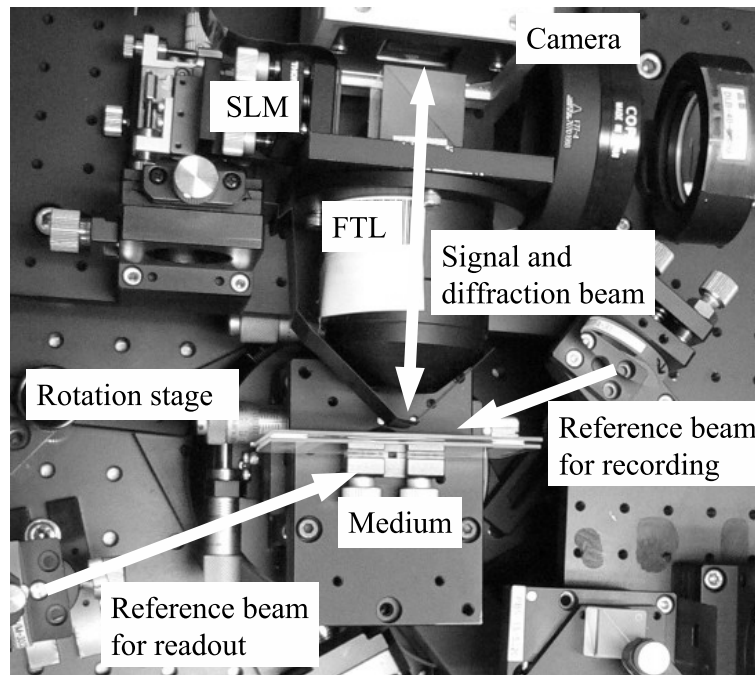


Fig. 2.8 Photo of optical setup for angle-multiplexed holographic memory experiment.

記録媒体にはフォトポリマーを記録材料とし、記録層厚さ 1 mm、両側を 2 枚のガラス板で挟んだものを用い、回転ステージ上に設置した。記録後には緑色 LED(light emission diode) により post cure することで、記録材料中のモノマーを完全に消費させる。回転ステージは 0.004° の分解能をもち、参照光軸と信号光軸を共に含む面内方向に回転することができる。回転角度 θ_m は信号光軸に媒体が垂直となる角度を 0° とし、また媒体と FTL との物理的干渉が生じない範囲を考慮すると θ_m は -3° から $+27^\circ$ まで計 30° 回転させることができる。また、 θ_m が増加する方向に媒体角度を変化させて角度多重を順に行うものとする。

再生時には、HWP1 により偏光方向を S 偏光のみとし、PBS1 を経由して HWP2 により P 偏光にされる。PBS2 を通過したビームは、記録した際と逆方向から P 偏光で媒体へ照射し、これにより位相共役再生を実現した。ホログラムからの回折光は矩形開口と FTL を通過して撮像素子に結像する。撮像素子として 2048×2048 の画素数、画素ピッチ $7.4 \mu\text{m}$ の CCD(charge-coupled device) 素子を用いた。位相共役再生であるから、高次回折光除去用として記録時に設置した矩形開口を再生時にも通過するが、これは同時に Fig. 2.5(a) の開口多重の構成要件を満たす。従って、参照光入射角度を変

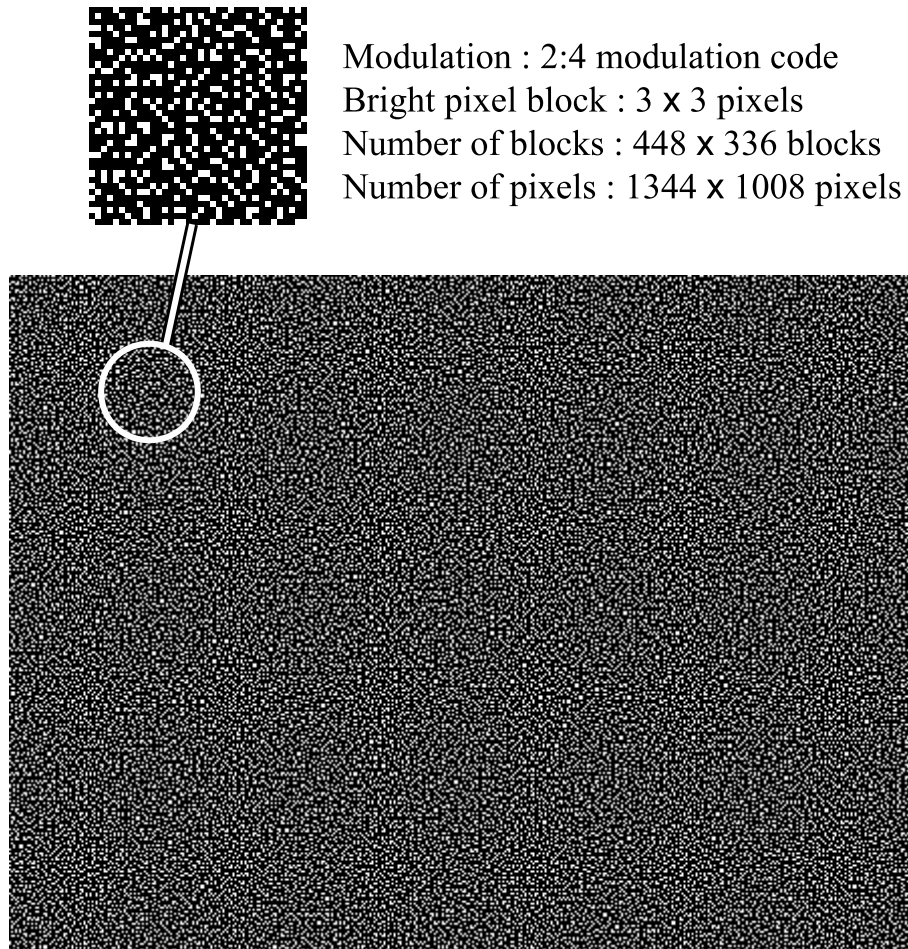


Fig. 2.9 A data page format.

化させることで角度多重するとともに、位置シフト方向については開口多重を行うことができる。

回折光を撮像して得られた再生像から、あらかじめ記録時に付加した微小なマーカ画像の位置をテンプレートマッチングにより検出する。Figure 2.10 に示す L 字形のマーカ画像をページデータの四隅に付加した [51]。またサブピクセル精度で位置検出するため、重心検出法 [52] を併用した。2:4 符号をデコードし、得られたビット列を元ビット列と比較することでビット誤り率 (BER : bit-error rate) を算出する。

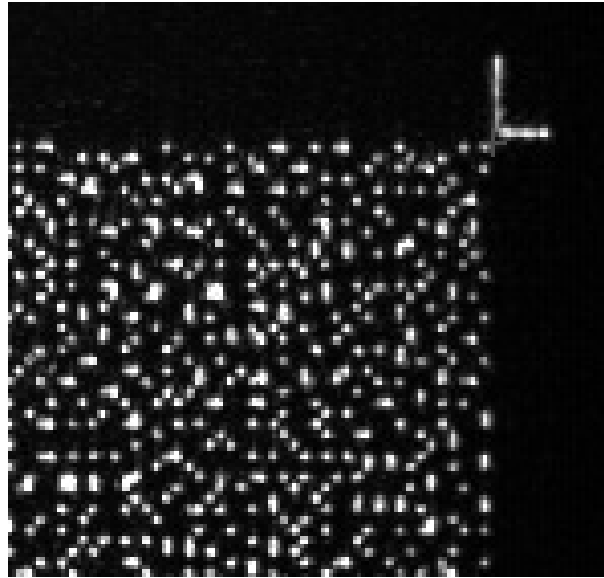


Fig. 2.10 A part of enlarged data page including L-shape marker.

2.4 記録密度向上の指針

角度多重と矩形開口による位置シフト多重とを併用した方式では，記録密度 D を以下の式で表すことができる [5] .

$$D = N/S \times m \quad (2.24)$$

ここで， N は1つのページデータが有する情報ビット数， S は矩形開口の面積， m は角度多重数である .

情報ビット数 N は，例えば1つのページデータの画素数が $M_x \times M_y$ の場合，1つの輝点ブロックが $N_o \times N_o$ 画素で表されるとすると 2:4 符号で $N = (M_x/N_o \times M_y/N_o)/2$ となり，一般化して表すと a:b 符号で $N = (M_x/N_o \times M_y/N_o) \times a/b$ と表せる . NRZ 符号の場合，1輝点ブロックを1ビットとして表せるので $N = M_x/N_o \times M_y/N_o$ となる . また，多値記録が可能な場合には1輝点ブロックで1ビット以上が表現可能なため，符号化効率を高め，情報ビット数 N が向上することから記録密度向上に有効である . 2.2.3 節で述べたとおり，多値記録のためにはシステムノイズの十分な低減が必須となる . ノイズ低減の検討については第6章で述べる .

次章以降で具体的に扱うが，角度選択性の高さは記録媒体の記録層厚さ T に比例し，

波長 λ に反比例する．すなわち，角度多重数 m は記録層厚さ T に比例すると考えてよい．今，単位厚さあたりの角度多重数を m_0 としたとき， $m = m_0 T$ と書くことができる．

一方，単位厚さあたりの角度多重数 m_0 については角度選択性に基づくものであるが，いくつかの向上策が考えられる．本研究で提案する多重数増加法は，角度選択性が参照光入射角度に依存することや，ページデータ内の場所ごとに角度選択性が異なることに注目したものである．これらについては第4章と第5章にて具体的な提案手法を述べる．

矩形開口の面積 S は，FTLの焦点距離 f ，ページデータの輝点ブロックピッチ d ，波長 λ と，光学的フーリエ変換面でのナイキスト空間周波数に対する倍率 χ を用いて，

$$S = \left(\chi \frac{f\lambda}{d} \right)^2 \quad (2.25)$$

と表せる [5]．記録密度向上のためには，FTLの焦点距離 f とレーザー波長 λ を短くし，また輝点ブロックピッチ d を広げることによって矩形開口面積を小さくすることが有効である．SLMの画素ピッチを d_{SLM} とすると $d = N_o d_{SLM}$ であるから，式 (2.24) は式 (2.25) を用いて

$$\begin{aligned} D &= N/S \times m \\ &= \frac{M_x/N_o \times M_y/N_o \times a/b}{\left(\chi \frac{f\lambda}{N_o d_{SLM}} \right)^2} \times m_0 T \\ &= \frac{a(M_x d_{SLM})(M_y d_{SLM})m_0 T}{b(\chi f\lambda)^2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

と書ける．レンズの短焦点距離化は2乗で記録密度向上に効果がある．また，式 (2.26) における単位厚さあたりの角度多重数 m_0 が波長 λ に反比例することから，記録密度 D は波長 λ の3乗に反比例することがわかる．CDからDVD，BDへと進化してきたのと同様，短波長化が記録密度向上に大きく貢献することは角度多重ホログラフィックメモリについても言える．

1つのページデータの面積 $(M_x d_{SLM})(M_y d_{SLM})$ を広げることも記録密度を高める作用があるが，この場合SLMの面積が増大し，これを通過させるための口径の大きなレンズを準備する必要が生じるため，コストと装置大型化の問題が出る可能性がある．

ナイキスト空間周波数に対する倍率 χ は通常 1.0~2.0 の範囲で設定される．この値

を小さくするほど、高い空間周波数成分が矩形開口を通過しなくなり、再生ページデータの信号品質が劣化する。しかしながら、必ずしも元のページデータを完全な画像として復元する必要はなく、最終的なビット誤りが許容値以下であればよい。これは特に、使用する符号や後段のフィルタリング、誤り訂正といった信号処理系の能力に左右される。

以上、記録密度向上のための重要なファクターについて述べたが、ホログラフィックメモリをシステムとして考えた場合、これらは必ずしも独立したパラメータといえず、システムパフォーマンスを最大にするよう、各パラメータを決定しなければならない。これについては、第6章にて具体的に述べる。

2.5 結言

本章では、ホログラフィックメモリの基本的原理となるホログラフィーについて光波のベクトル表現とスカラー量(複素振幅)による表現を用いて説明した。また、様々な多重記録方式とそれらの得失について述べた。ホログラフィックメモリの実用化に不可欠な要素となる、システムの安定性や機器互換性、要求される機械精度の実現性を鑑み、本研究で角度多重方式に焦点を置く理由を説明した。

角度多重ホログラフィックメモリにおける記録密度向上には、光源の短波長化、FTLの短焦点距離化、記録媒体厚さの増加が有効であることが示唆された。これらのファクターはレーザーやレンズ設計、媒体などのデバイス・材料開発に依存する項であり、近年目覚しく進展しつつある。一方、デバイス・材料に依存せずシステムとしてさらなる密度向上を図るにあたり、単位厚さあたりの角度多重数など解決すべき課題が残されている。

例えば記録密度・多重数の向上と高信号品質・低ビット誤り率はトレードオフの関係にあり、ホログラフィックメモリの最大記録容量に制限を与えることになる。角度多重方式の記録密度向上においては、許容されるビット誤り、信号品質劣化、クロストーク量を超えない範囲で隣接ページデータ間の参照光角度間隔を狭くし、多重数を増加させる必要がある。さらなる記録密度向上には従来提案されていない手法が求められており、第4章以降で具体的な記録密度向上手法を提案し、その妥当性を検証する。

参考文献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, Vol.161, pp.777-778, 1948.
- [2] 辻内順平, "ホログラフィー," 裳華房, 東京, 1997.
- [3] P. J. van Heerden, "A New Optical Method of Storing and Retrieving Information," *Applied Optics*, Vol.2, pp.387-392, 1963.
- [4] P. J. van Heerden, "Theory of Optical Information Storage in Solids," *Applied Optics*, Vol.2, pp.393-400, 1963.
- [5] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol.92, pp.1231-1280, 2004.
- [6] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox (Eds.), "Holographic Data Storage," Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [7] J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage," *IBM Journal of Research and Development*, Vol.44, pp.341-368, 2000.
- [8] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and B. Marcus, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Optics Letters*, Vol.22, pp.639-641, 1997.
- [9] T. Kume, S. Yagi, T. Imai, and M. Yamamoto, "Digital Holographic Memory Using Two-Dimensional Modulation Code," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.40, pp.2296-2300, 2001.
- [10] G. W. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and M. A. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Optics Letters*, Vol.23, pp.1218-1220, 1998.
- [11] L. d'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak, and E. Spitz, "Experimental Holographic Read-Write Memory Using 3-D Storage," *Applied Optics*, Vol.13, pp.808-818, 1974.
- [12] Y. Liu, K. Kitamura, S. Takekawa, G. Ravi, M. Nakamura, Y. Furukawa, and H. Hatano, "Comparison of Two-Color Hologram Lifetimes of Near-Stoichiometric Lithium Niobate and of Tantalate Crystals," *Applied Optics*, Vol.43, pp.5778-5783, 2004.
- [13] J. Imbrock, D. Kip, and E. Kratzig, "Nonvolatile holographic storage in iron-doped lithium tantalate with continuous-wave laser light," *Optics Letters*, Vol.24, pp.1302-1304, 1999.
- [14] L. Hesselink, S. S. Orlov, A. Liu, A. Akella, D. Lande, and R. R. Neurgaonkar, "Photorefractive Materials for Nonvolatile Volume Holographic Data Storage," *Science*, Vol.282, pp.1089-1094, 1998.
- [15] M. L. Schilling, V. L. Colvin, L. Dhar, A. L. Harris, F. C. Schilling, H. E. Katz, T. Wysocki, A. Hale, L. L. Blyler, and C. Boyd, "Acrylate Oligomer-Based Photopolymers for Optical Storage Applications," *Chemistry of Materials*, Vol.11, pp.247-254, 1999.
- [16] L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. L. Schilling, M. G. Schnoes, and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage," *Optics Letters*, Vol.24, pp.487-489, 1999.

- [17] L. Dhar, K. Curtis, and T. Fäcke, "Holographic data storage: Coming of age," *Nature Photonics*, Vol.2, pp.403-405, 2008.
- [18] H. Yamatsu, M. Ezura, and N. Kihara, "Study on Multiplexing Methods for Volume Holographic Memory," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'05)*, ThE1, 2005.
- [19] E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Applied Optics*, Vol.5, pp.1303-1311, 1966.
- [20] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO₃ crystal," *Optics Letters*, Vol.16, pp.605-607, 1991.
- [21] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Optics Letters*, Vol.18, pp.915-917, 1993.
- [22] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Optics Letters*, Vol.19, pp.993-994, 1994.
- [23] G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," *Applied Optics*, Vol.35, pp.2403-2417, 1996.
- [24] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," *Optics Letters*, Vol.17, pp.1471-1473, 1992.
- [25] C. Denz, G. Pauliata, G. Roosena, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Optics Communications*, Vol.85, pp.171-176, 1991.
- [26] M. Ezura, S. Baba, and N. Kihara, "Holographic Memories Using 2-Dimensional Phase-Code Multiplexing Method," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.43, pp.4954-4958, 2004.
- [27] 石井紀彦, 木下延博, 椎野弘崇, 藤掛英夫, 上條晃司, 清水直樹, 佐藤史郎, "位相対称離散コサイン変換行列を用いた位相コードホログラム多重記録方式," *映像情報メディア学会誌*, Vol.59, pp.1869-1874, 2005.
- [28] 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*, Vol.43, pp.4902-4914, 2004.
- [29] O. Matoba, Y. Yokohama, M. Miura, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Reflection-type holographic disk memory with random phase shift multiplexing," *Applied Optics*, Vol.45, pp.3270-3274, 2006.
- [30] M. Miura, O. Matoba, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Three-dimensional shift selectivity in reflection-type holographic disk memory with speckle shift recording," *Applied Optics*, Vol.46, pp.1460-1466, 2007.
- [31] O. Matoba and B. Javidi, "Encrypted optical memory system using three-dimensional keys in the Fresnel domain," *Optics Letters*, Vol.24, pp.762-764, 1999.
- [32] 横浜由二, 的場修, 吉村武晃, "光暗号化反射型シフト多重ホログラフィックメモリ," *日本光学会年次学術講演会 Optics Japan 講演予稿集*, 9pD4, pp.464-465, 2003.
- [33] 的場修, "光暗号化によるセキュリティーホログラフィックメモリー," *ホログラフィックメモリーのシステムと材料*, 第2章, シーエムシー出版, 東京, 2006.
- [34] 木下延博, 椎野弘崇, 室井哲彦, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, "スペックル参照光を用いた角度多重ホログラム記録," *映像情報メディア学会年次大会講演予稿集*, 6-8, 2006.
- [35] 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, "スペックル参照光を用いた角度多重ホログラムの実験的評価," *電子情報通信学会技術研究報告*, MR2006-63, pp.37-42, 2006.

- [36] Y. Nagasaka, K. Okada, A. Nakamura, M. Tanaka, A. Kobayashi, T. Ueyama, S. Yoshida, and Y. Kurata, "Method Combining Focus-Shift and Angle Multiplexing Method for Holographic Data Storage," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, pp.5904-5908, 2008.
- [37] N. Ishii, N. Kinoshita, T. Muroi, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Improved Signal-to-Noise Ratio Using Phase Compensation in Shift- and Angle-Multiplexed Holographic Data Storage," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, pp.5989-5992, 2008.
- [38] E. Fernández, M. Ortuño, S. Gallego, C. García, A. Beléndez, and I. Pascual, "Comparison of peristrophic multiplexing and a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing in a thick PVA/acrylamide photopolymer for data storage," *Applied Optics*, Vol.46, pp.5368-5373, 2007.
- [39] J.-S. Jang, D.-H. Shin, and Y.-S. Park, "Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing," *Optical Engineering*, Vol.39, pp.2975-2981, 2000.
- [40] K. Anderson and K. Curtis, "Polytopic multiplexing," *Optics Letters*, Vol.29, pp.1402-1404, 2004.
- [41] T. Imai, T. Kurihara, S. Yagi, Y. Kurokawa, M. Endo, and T. Tanabe, "Orthogonal Aperture Multiplexing for Multilayered Waveguide Holographic Read-Only Memories," *Applied Optics*, Vol.42, pp.7085-7092, 2003.
- [42] K. Anderson, E. Fotheringham, S. Weaver, B. Sissom, and K. Curtis, "How to Write Good Books," *Technical Digest of Optical Data Storage (ODS'06)*, pp.150-152, 2006.
- [43] H. Horimai, X. Tan, and J. Li, "Collinear holography," *Applied Optics*, Vol.44, pp.2575-2579, 2005.
- [44] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, "Improved performance in coaxial holographic data recording," *Optics Express*, Vol.15, pp.16196-16209, 2007.
- [45] A. Hoskins, B. Ihas, K. Anderson, and K. Curtis, "Monocular Architecture," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, pp.5912-5914, 2008.
- [46] A. Aharoni, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Distortion-free multiplexed holography in striated photorefractive media," *Applied Optics*, Vol.32, pp.1973-1982, 1993.
- [47] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Angular interval scheduling for angle-multiplexed holographic data storage," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'08)*, TuP10, 2008.
- [48] 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*, Vol.48, 03A029, 2009.
- [49] Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Assessment of cross-talk noise in confocal scheme in reflection-type holographic memory with speckle shift multiplexing," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'09)*, Tu-G-20, 2009.
- [50] H. Gu, S. Yin, Q. Tan, L. Cao, Q. He, and G. Jin, "Improving signal-to-noise ratio by use of a cross-shaped aperture in the holographic data storage system," *Applied Optics*, Vol.48, pp.6234-6240, 2009.
- [51] 木下延博, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, 室井哲彦, "ホログラムデータ領域特定装置及びホログラムデータ領域特定プログラム," 特願 2006-325002.
- [52] 橋本道一, 立石潔, 富田吉美, "ホログラムメモリーにおけるマーカ位置の高精度検出法," *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.104, pp.49-52, 2005.

第3章 記録再生シミュレータ

3.1 緒言

ホログラムの再生特性解析については、古くは Kogelnik が音響光学的なアプローチにより結合波理論 (CWT : coupled-wave theory) を考案し [1]、さらに近似を取り去った厳密結合波解析 (RCWA : rigorous couple-wave analysis) が Moharam と Gaylord によって構築された [2,3]。これらはシンプルな解析対象に対して高速かつ精度よく解を求めることができるため、今日でもホログラフィック光学素子や回折光学素子などの設計によく用いられる [4,5]。ここでいうシンプルな解析対象とは、ホログラム内部における干渉縞が一様な分布を持ち、ある関数で解析的に表現または近似的に表現されるものをいう。

実際のホログラフィックメモリにおいては、ページデータが媒体中に干渉縞として高密度記録・保持されており、また干渉縞が信号光で変調された形態をとるため、その分布は一様とは言えない。この場合のシミュレーション手法として、再生光が微小な屈折率変化による散乱の集合として扱う Born 近似 [6,7]、Kogelnik の結合波理論を応用した拡張結合波理論 [8-10]、画素分布関数のコンボリューションとして結合波理論をベースに解く方法 [11] などが提案されてきた。

本章では計算機シミュレーション手法として有限差分時間領域法 (finite-difference time-domain method) [12-18] とスカラー回折理論に基づく手法 [19-22] の2つについて述べる。有限差分時間領域法は時間領域で光波伝搬を逐次計算するものであり、ホログラムすなわち干渉縞パターンの屈折率分布の中で光波がどのように伝搬・回折するか視覚的に把握することができる。スカラー回折理論に基づく手法は記録媒体をその厚さ方向に層分割し、各層での光波の回折を積算することにより再生光を求める手法である。

3.2 有限差分時間領域法によるシミュレータ

3.2.1 定式化

有限差分時間領域法は 1966 年に K.S.Yee によって考案された電磁界の計算機シミュレーション手法であり，マクスウェルの方程式を差分表現により離散化して直接的に解く [23]．解析領域全体は微小なセルで分割される．

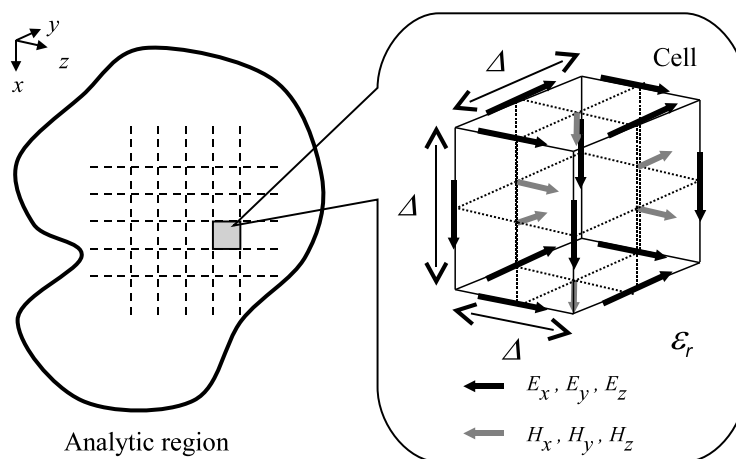


Fig. 3.1 Arrangement of electromagnetic components in a cell in analytical region.

Figure 3.1 は一辺の長さが Δ のセルにおける電磁界成分配置を示したものである．全セルの電磁界成分および誘電率などのパラメータは空間的に離散化して計算機メモリ上に展開される．このとき，電界と磁界は $\Delta/2$ だけ位置をずらして配置することで，rotation の演算を容易に行うことが可能となる．式 (2.3)，(2.4) で示したとおり，電界は磁界の rotation から，磁界は電界の rotation から順次時間ステップに従って逐次更新を繰り返し，一定ステップの更新が終了した時点での電磁界分布が最終的に得られる．

次に時間的な離散化について説明する．式 (2.3)，(2.4) に構成方程式 (2.5) ~ (2.7) を代入すると，

$$\nabla \times \mathbf{E} + \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.2)$$

を得る．時刻 $t = n\Delta t$ での電磁界の状態を \mathbf{E}^n , \mathbf{H}^n と表し，式 (3.1) から時間の離散化を行うと，

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad (3.3)$$

$$\frac{\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n \quad (3.4)$$

が得られる． $\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}}$ についてまとめると，

$$\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}^n \quad (3.5)$$

となる．これは，時刻 $(n+1/2)\Delta t$ での磁界が，その直前の電界と磁界により決定されることを意味する．一方，式 (3.2) については，

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (3.6)$$

$$\frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

が得られる． \mathbf{E} と \mathbf{H} は時間および空間の離散化において，それぞれ $\Delta t/2$ と $\Delta/2$ だけずれた配置とする．離散化により \mathbf{E} のとる時間を Δt の整数倍とすると， $\mathbf{E}^{n-\frac{1}{2}}$ を中央差分 $(\mathbf{E}^n + \mathbf{E}^{n-1})/2$ で近似したときの式 (3.7) は

$$\frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\mathbf{E}^n + \mathbf{E}^{n-1}}{2} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

と書ける． \mathbf{E}^n についてまとめ， $s \equiv \sigma \Delta t / 2\varepsilon$ とおくと

$$\mathbf{E}^n = \frac{1-s}{1+s} \mathbf{E}^{n-1} + \frac{\Delta t / \varepsilon}{1+s} \nabla \times \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

が得られる．これは，時刻 $n\Delta t$ での電界が，それ以前の時刻での電界と磁界により決定されることを意味する．初期状態 ($t=0$) の電磁界から時間ステップ Δt ごとに順次電界と磁界を更新することで計算を進行させる．

有限差分時間領域法による数値シミュレーションの流れを Fig. 3.2 に示す．解析対象領域の構造と電磁界成分を計算機メモリに全て展開するため，計算コストという観点

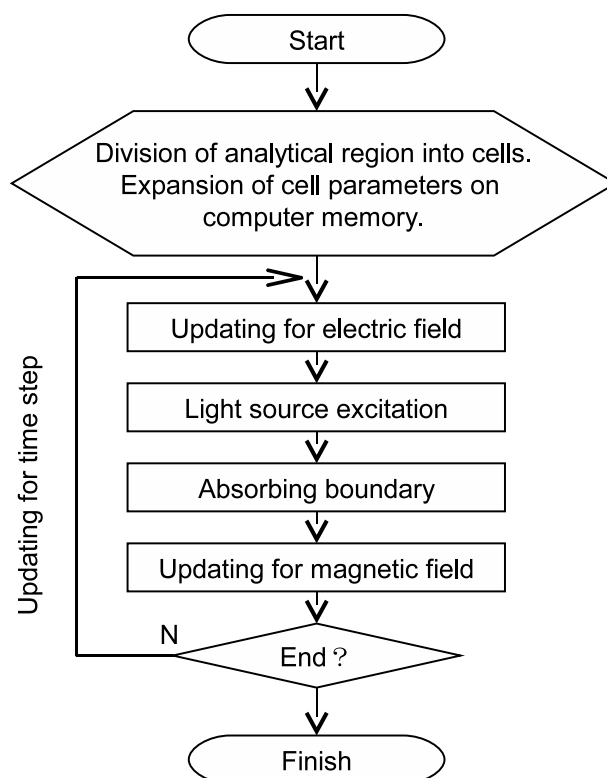


Fig. 3.2 Calculation flow chart in FDTD method.

からすれば必ずしも効率的ではないが、

1. 解の視覚化が容易でホログラム内部における回折・光伝搬をイメージしやすい
2. 解析対象の構造を任意に設定できるため、複雑な干渉縞分布やホログラム中の構造的欠陥などを容易にモデル化できる

といった特長がある。

元来マイクロ波・ミリ波の散乱や伝搬の問題に広く適用されてきた。近年では光の分野(フォトニック結晶 [24], 光ディスク [25,26], Super-RENS [27])などの解析に用いられているが、ホログラフィックメモリへの有限差分時間領域法の適用はこれまで報告例がない。そこで本節ではホログラフィックメモリにおける回折光を数値解析することで、その有効性を検証する。

3.2.2 厳密結合波解析との比較

ホログラフィックメモリなどの体積ホログラムに不可欠な三次元シミュレーション手法について述べる前に，参照光・信号光とも平面波を用いた場合の一様なホログラムを例に二次元シミュレーションを行う．ここでは Moharam と Gaylord が厳密結合波解析で取り扱った [2] 一様なホログラム (planar-grating) を解析モデルとして取り上げ，基本的なシミュレーションの流れを述べるとともに，厳密結合波解析との比較により有限差分時間領域法の妥当性を検証する．

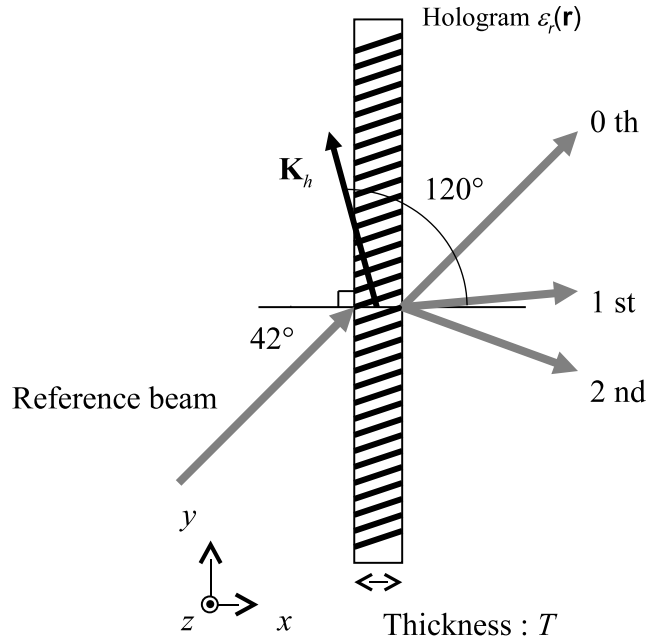


Fig. 3.3 Two-dimensional FDTD simulation model for uniformly slanted grating hologram.

Figure 3.3 に示すように，厚さ T の透過型ホログラムが z 方向に十分広く存在し，どの位置 z に対しても同一の $x-y$ 面内分布を有する場合について二次元領域シミュレーションを行う．ホログラムは次式の比誘電率分布として表されているとする．

$$\epsilon_r(\mathbf{r}) = \epsilon_{ave} + \epsilon_{amp} \cos(\mathbf{K}_h \cdot \mathbf{r}) \quad (3.10)$$

ただし， ϵ_{ave} と ϵ_{amp} はそれぞれ比誘電率の平均値と振幅値である．また， \mathbf{r} はホログラム内の位置ベクトルである．格子ベクトル \mathbf{K}_h を

$$\mathbf{K}_h = (K_{hx}, K_{hy}) = \frac{2\pi}{\Lambda} (\cos 120^\circ, \sin 120^\circ) \quad (3.11)$$

で与え，比誘電率の平均値 $\epsilon_{ave} = 2.25$ ，ホログラムの比誘電率振幅 $\epsilon_{amp} = 0.27$ ，縞間隔 $\Lambda = 853$ nm，セルの大きさ $\Delta = 8.4$ nm，光の真空中波長 $\lambda_0 = 532$ nm にて計算を行う．簡単のため，ここでは z 方向の直線偏光の場合を考える．

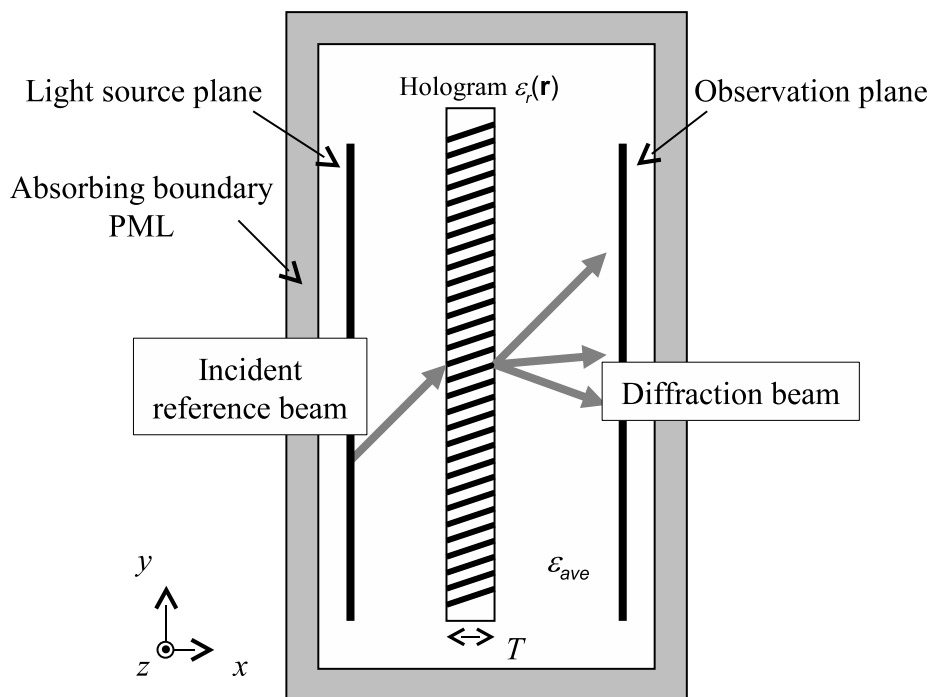


Fig. 3.4 Conceptual diagram of two-dimensional analytical region.

Figure 3.4 は二次元解析領域全体を示す概念図である．中央部にあるホログラム領域の両側にそれぞれ波源面と観測面を配置し，解析領域全体を一辺の長さ Δ のセルで分割する．最外周部での光波の反射を防ぐため領域全体を吸収境界で取り囲むことにより，開放領域の現象も扱うことができる．ここでは吸収境界として PML(perfectly matched layer) を用いた [28]．場所ごとの電磁界成分と比誘電率を計算機メモリ上に展開し，式 (3.10) によりホログラムを比誘電率分布として与える．波源面から再生用参照光を伝搬させ，ある時間経過分だけ Fig. 3.2 に示した電磁界成分の更新を繰り返すと，再生された回折光の電磁界成分が観測面にて得られる．最終的にはこの電磁界成分から式 (2.11) に示したポインティング・ベクトルを算出することで回折効率が求められる．

参照光をホログラムへ入射させるための波源面は，電界を励振する電圧源で構成した．波源面は任意の波面を生成させることができるが，ここでは z 方向直線偏光の平面波を励振させた．後述の三次元シミュレーションへの拡張を考えて記すと， x, y, z

軸と為す角 α, β, γ とする方向へ出射される平面波 $\varphi(\mathbf{r})$ は、波源面上の位置 \mathbf{r} において時間項を省略すれば、

$$\varphi(\mathbf{r}) = g(\mathbf{r}) \cdot \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (3.12)$$

と書ける。ただし、波数ベクトルは

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda_e} (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma) \quad (3.13)$$

であり、 λ_e は実効波長、 $g(\mathbf{r})$ はビームプロファイルを与える強度分布関数である。x-y 平面内における二次元シミュレーションの場合は $\gamma = 90^\circ$ として考えればよい。今回は参照光を x 軸に対し 42° で照射するので、 $\alpha = 42^\circ, \beta = 48^\circ$ となる。

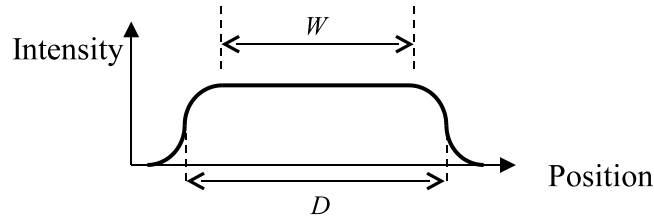


Fig. 3.5 Beam profile given as a flat cosine-squared window function.

ビームエッジからの不要な回折パターンの影響を除去するために、付与するビームプロファイルに工夫が必要である。ここでは、ビームプロファイルを Fig. 3.5 に示すような flat cosine-squared 窓関数 [29] とし、次式で与えるものとする。

$$g(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq s(\mathbf{r}) \leq W/2 \\ \cos^2 \left\{ \frac{s(\mathbf{r}) - W/2}{2(D - W)} \pi \right\}, & W/2 \leq s(\mathbf{r}) \leq D - W/2 \\ 0, & D - W/2 \leq s(\mathbf{r}) \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで、

$$s(\mathbf{r}) = \frac{|(\mathbf{r} - \mathbf{r}_c) \times \mathbf{k}|}{|\mathbf{k}|} \quad (3.15)$$

であり、 \mathbf{r}_c は任意のビーム中央点を表す位置ベクトル、 W はビームプロファイルのフラット部分の幅、 D はビーム半値幅であり、 $(2D - W)$ はビーム全幅を表す。

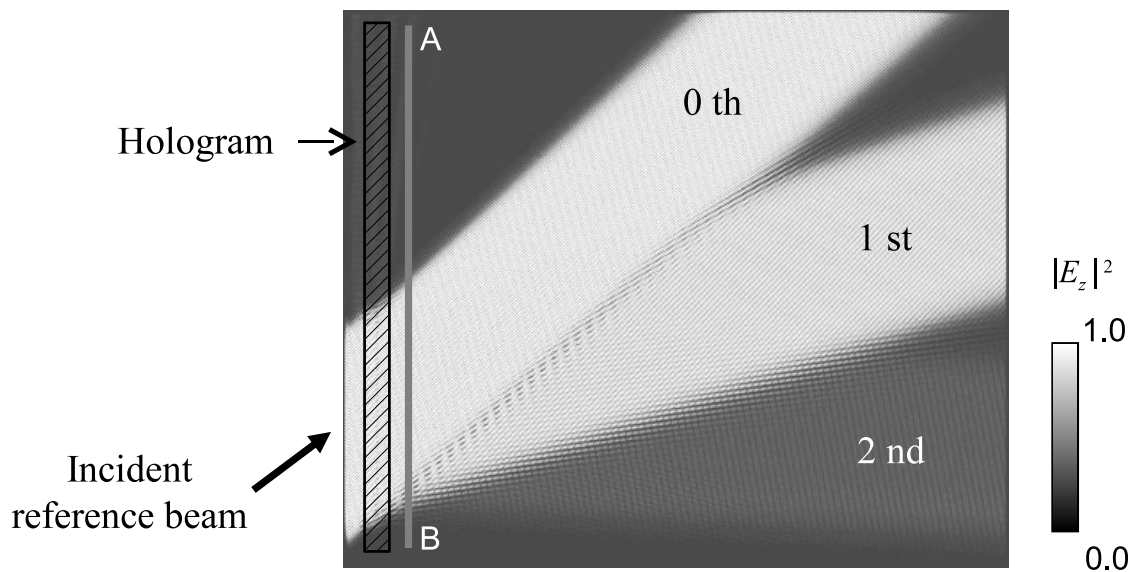


Fig. 3.6 FDTD simulation result of electric field of diffracted beams in two-dimensional analytical region.

Figure 3.6 は、解析領域内に設置したホログラムへ参照光を入射させて得られた回折光の伝搬の様子を、電界強度分布として図示したものである。回折光は 0 次 (透過光)、1 次のみでなく、高次まで全て含んだ電磁界分布である。ただし、3 次以降は強度が小さいため図での確認は困難である。0 次から高次までの回折光を空間的に分離して算出するためには極めて大きな解析領域を必要とすることがわかる。従って実際の計算においては、Fig. 3.6 の A-B 間に観測面を配置し、必要な解析領域を削減することで計算機資源を節約できる。観測面で得られた高次まで全て含む電磁界分布を適当な窓関数により切り出したのちフーリエ変換することで、異なる空間周波数成分に回折光を分離し、それぞれのポインティング・ベクトルを求めればよい。窓関数としては Blackman 窓を用いた。数値計算におけるフーリエ変換は FFT (fast Fourier transform) により実装した。またここでは W と $(2D - W)$ をそれぞれホログラム格子の y 方向寸法の 0.8 倍、1 倍とした。

次に、有限差分時間領域法と厳密結合波解析との比較を示す。ホログラム厚さ T を変化させたときの 0 次光、1 次光、2 次光の回折効率を厳密結合波解析による結果とともに Fig. 3.7 に示す。縦軸は回折効率、横軸はホログラムの厚さ T を縞間隔 Λ で規格化した。有限差分時間領域法と厳密結合波解析の差は最大で 2% 程度であり、セル分割

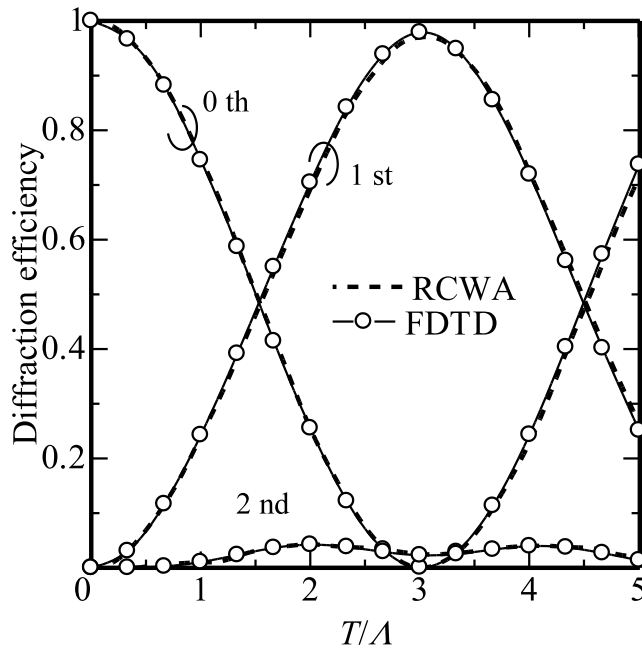


Fig. 3.7 Comparison between FDTD method and RCWA for normalized diffraction efficiency as a function of hologram thickness, T .

数に依存した計算誤差が考えられる．一般にセル分割を細かく設定するほど誤差を小さくすることができる [12]．本研究で採用した2次の中心差分による離散化では，セルの大きさを波長の1/40とした場合に2~3%の誤差を生じる [30,31] ことから，本計算結果が妥当であると言える．より高精度な解を必要とする問題に対しては，セル分割数を増すほか，4次の中心差分 [32,33] を採用することが有効と考えられる．

ホログラムの厚さが厚くなるに従い，0次光(透過光)の強度が下がり1次光の強度が上昇する．1次光の回折効率が最大となるのは T/Λ がおよそ3.0のときであり，97%に達している．Kogelnikの結合波理論 [1] によれば，位相ホログラムにおける1次回折光の最大回折効率は100%に達するとされているが，結合波理論は2次以上の高次回折光を省略するので Fig. 3.7の結果と差異を生じる．さらにホログラムを厚くすると1次回折光の回折効率が下がるが，これはホログラムの浅い部分で生じた1次回折光が再回折により0次光側へ射出するためである．

3.2.3 角度多重ホログラフィックメモリの再生シミュレーション

ホログラフィックメモリは媒体中の体積内に干渉縞を記録するため、本質的に解析領域として三次元領域を対象とすることが不可欠となる。ここでは、角度多重されたホログラムについて、有限差分時間領域法を用いた三次元領域シミュレーションを行う。

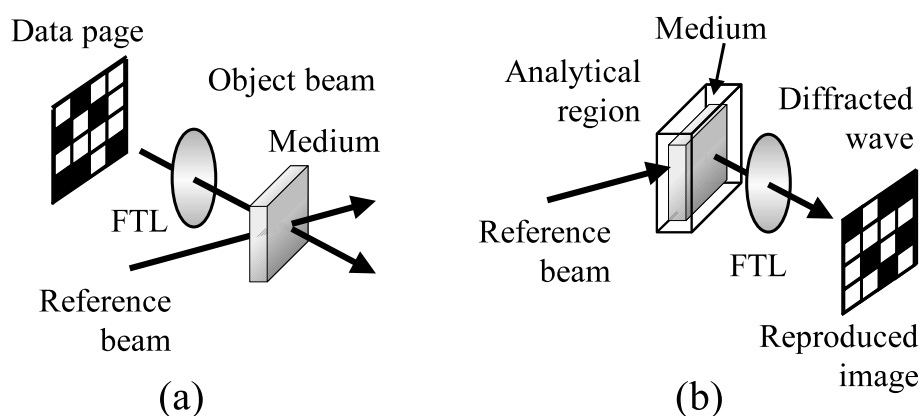


Fig. 3.8 Three-dimensional simulation model for FDTD method.

Figure 3.8 に角度多重ホログラフィックメモリのシミュレーションモデルを示す。二次元ページデータで変調された信号光がFTLを通り媒体へ照射され、参照光との二光束干渉によって生じる干渉縞がフォトポリマーに屈折率分布すなわち誘電率分布として記録される。この記録過程では、媒体内部にどのような誘電率分布が形成されるか計算する必要がある。

再生時には参照光のみを媒体に照射することで信号光が再生される。この場合、3.2.2項で述べたものと同様、参照光波源を解析領域内に波源面として設置し励振させる。

媒体の記録領域と、その近傍に光の入出力面を含んだ Fig. 3.8(b) のワイヤフレーム部分を解析領域として設けた。また、解析領域の媒質は非分散性かつ等方性であるとした。以上の計算の流れを Fig. 3.9 に、解析領域内の波源面、観測面、ホログラム配置を Fig. 3.10 にそれぞれ示す。

有限差分時間領域法において、一般的にセルの大きさ Δ は実効波長 λ の $1/10 \sim 1/20$ 程度に設定される。セルの大きさを小さくするほど厳密な解に収束するが、計算時間を短縮するために、どの程度のセルの大きさが許容されるか調べる必要がある。そこ

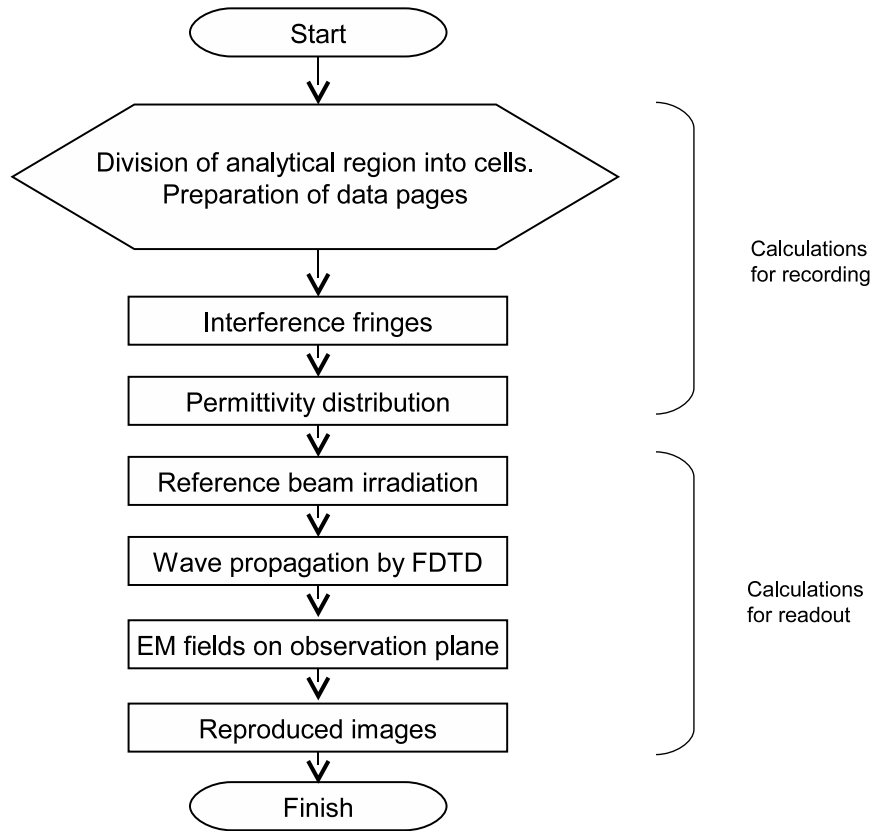


Fig. 3.9 Flow chart for three-dimensional FDTD simulation.

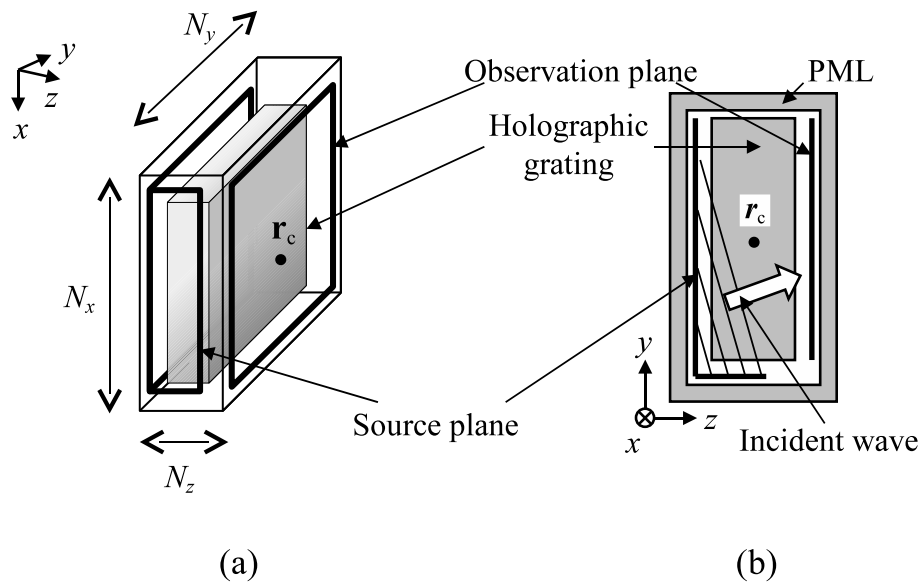


Fig. 3.10 Analytical region for three-dimensional FDTD simulation.

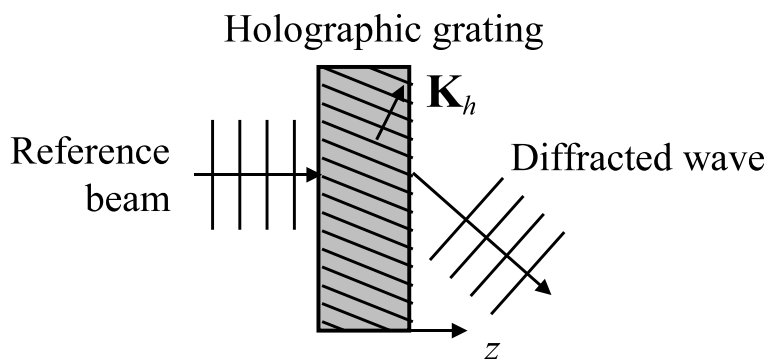


Fig. 3.11 Uniformly slanted holographic grating for three-dimensional FDTD simulation.

Table 3.1 FDTD simulation parameters for uniformly slanted holographic grating with reference and signal beams as plane waves in three-dimensional analytical region.

Wavelength in free space, λ_0	532 nm
Polarization	Linear (y-direction in Fig. 3.10)
Average relative permittivity, ϵ_{ave}	2.25
Angle, α	14.3°
Fringe spacing, Λ	700 nm
Analytical region size	10.8 × 10.8 × 5.9 μm
Holographic grating size	10.5 × 10.5 × 4.2 μm

で三次元シミュレーションにおいても最も基本的な解析対象である Fig. 3.11 のような単一ホログラムを考える．式 (3.10) で示される屈折率分布において $\epsilon_{ave} = 2.25$ とし，セルの大きさ Λ を変えながら回折効率を数値計算する．式 (3.10) 中の格子ベクトル \mathbf{K}_h は，角度 α を用いて次式で与えた．

$$\mathbf{K}_h = \frac{2\pi}{\Lambda} (\sin \alpha, \sin \alpha, \sqrt{1 - 2 \sin^2 \alpha}) \quad (3.16)$$

Figure 3.11 のとおり，参照光は z 軸に沿ってホログラムへ照射されるものとする．参照光と信号光は進行方向が異なる，すなわち波数の異なる波の重なりであるから，3.2.2 項と同様に FFT によって空間周波数上で両者を分離し，回折波を求める．計算パラメータは Table 3.1 のとおり設定し，実効波長に対するセル分割数を 4.2，8.4，16.8 と変化

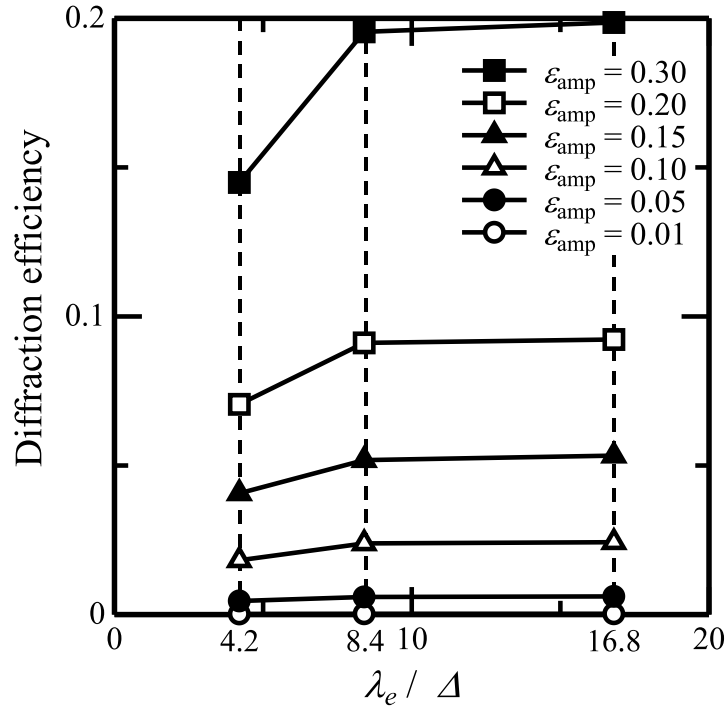


Fig. 3.12 Cell size dependencies in various relative permittivity amplitude.

させ、回折効率を計算した結果が Fig. 3.12 である。どの比誘電率振幅 ϵ_{amp} でもセル分割数 8.4 での強度は 16.8 の時に比べて相対誤差 5% 以内であった。ここでは角度多重方式における各ページデータの分離再生過程を定性的に調べるため、実効波長に対するセル分割数を 8.4 に決定した。より高精度な定量的評価を行う場合には、それ以上のセル分割数が必要である。

次に、ページデータを三次元体積内に角度多重記録した場合のシミュレーションを行う。記録するページデータは Fig. 3.13 のごとく「ST」と「RL」と書かれた二枚の画像とする。信号光は Fig. 3.10 中の z 軸方向に入射、平面波である参照光の角度は信号光軸に対し「ST」の場合 45° 、「RL」の場合 50° で多重されるようにホログラム干渉縞を構成する。ここでいう参照光角度は空気中ではなく媒体中の角度である。また、媒体中の一箇所に信号光 DC 成分の強度ピークが出るのを避けるため、ページデータの



Fig. 3.13 Two data pages, "ST" and "RL."

Table 3.2 Three-dimensional FDTD simulation parameters for angle-multiplexed holograms.

Number of data pages	2
Number of pixels on a data page	16×16
Reference beam angles for recording to the z axis	45°, 50°
Signal beam angle to the z axis	0°
Average relative permittivity	2.25
Relative permittivity amplitude per angular spectrum	0.01
Wavelength in free space	532 nm
Analytical region size	21.6 × 21.6 × 11.8 μm
Number of cells ($N_x \times N_y \times N_z$)	512 × 512 × 280
Holographic grating size	20.8 × 20.8 × 10.8 μm
Length on a side of a cell, Δ	42.2 nm
Number of PML layers	16

各輝点はランダムな位相を有するとして計算を進める．解析パラメータを Table 3.2 に示す．

有限差分時間領域法は電磁界 6 成分によるフルベクトル計算とするが，解析領域の媒質は非分散性かつ等方性であるとした．

Figure 3.8(a) 記録光学配置では二次元ページデータが SLM に表示され，これにより信号光は空間的にデータで変調される．媒体中を伝搬した信号光波面は Fresnel-Kirchhoff 回折積分により求めることができるが，二次元のページデータの各点から三次元の媒体中への寄与を全て数値計算するには，通常 5 重ループ演算となり膨大な計算時間を要することになる．これを回避するため，ここでは角スペクトル (angular spectrum) に

展開する手法 [34] を採用した．角スペクトル展開とは，ある光波面を様々な空間周波数の平面波 (スペクトル関数) による重ね合わせであると考える．波面 g_0 が少し離れた場所でどのような波面 g_1 として記述されるかを次に述べる．

媒体内部のある $x - y$ 面内 ($z = z_0$) における信号光の複素振幅 $g_0(x, y, z_0)$ は，次のようにスペクトル関数 $G_0(u, v, z_0)$ に変換される．

$$G_0(u, v, z_0) = \iint g_0(x, y, z_0) \exp \{-j2\pi(ux + vy)\} dx dy \quad (3.17)$$

z 方向に z_0 から L だけ離れた場所 z_1 でのスペクトル関数 $G_1(u, v, z_1)$ は，平面波の一定距離の伝搬と考えれば次のように記述できる．

$$G_1(u, v, z_1) = G_0(u, v, z_0) \exp \left\{ -jkL \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right\} \quad (3.18)$$

ただし， $k = 2\pi/\lambda$ であり，

$$(\lambda u)^2 + (\lambda v)^2 \leq 1 \quad (3.19)$$

を満たす必要がある．最終的に z_1 における信号光の複素振幅 $g_1(x, y, z_1)$ は $G_1(u, v, z_1)$ を用いて，

$$g(x, y, z_1) = \iint G_1(u, v, z_1) \exp \{j2\pi(ux + vy)\} dudv \quad (3.20)$$

により得られる．この計算を全ての z 位置で繰り返せば，媒体内部における信号光波面分布が求められる．3.3 節でも述べるが，数値計算においては式 (3.17) を FFT，式 (3.18) を簡単な位相操作，式 (3.20) を逆 FFT により実行できるので，媒体内部の信号光波面分布が高速に計算され，参照光と信号光の干渉縞分布も簡単に得られる．

次に干渉縞分布から媒体内部の誘電率分布への変換を行う．一般にフォトポリマーを用いたホログラフィックメモリでは，屈折率変調あるいは比誘電率変調の大きさが露光量に比例する線形領域を使用する．従って本計算においても，媒体の比誘電率の変化が光量に比例すると仮定している．実際の媒体構成によっては必ずしも光量に比例した比誘電率変調が得られるとは限らないので，より詳細な媒体条件を記述するために例えば局所的な反応特性 (拡散方程式など) を導入したり，既に記録済みの領域におけるモノマー残量を考慮したりする検討が Toishi らや Yoshida らにより進められている [35, 36] ．

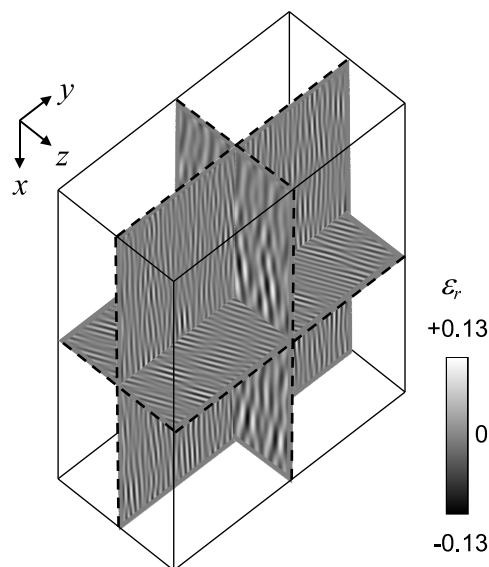


Fig. 3.14 Relative permittivity distribution in the holographic medium multiplexed angularly with two data pages.

スペクトル関数 $G(u, v)$ あたりの干渉縞の比誘電率変調振幅 ε_{amp} を 0.01 とする．各セルにおける比誘電率の初期値を実際のフォトポリマー媒体に近い値 2.25 とし，全てのスペクトル関数について比誘電率変調を積算すれば最終的な比誘電率分布が得られる．計算により得られた干渉縞分布図を Fig. 3.14 に示す．ページデータ上の各画素からの光がランダムな位相を有すると仮定しているので，媒体中で信号光 DC 成分の強度ピークはみられない．

ホログラムの再生過程では，先に求めた比誘電率分布に参照光をある角度で進入させ，光の伝搬を有限差分時間領域法により計算した．回折光が観測面に出現し，その電磁界分布が時間的に収束するまでの 200 fs だけ計算を継続した．実際に計算で求めた x 方向電界成分 E_x の分布を斜視図として Fig. 3.15 に示す．観測面では透過した参照光と再生光の両方を含んだ電磁界分布が得られる．一様なホログラムの場合と同様の手法で両者を分離できるが，特にフーリエ変換型ホログラムの場合には逆フーリエ変換または信号光のフーリエ変換面を基準とした平面波展開を再度適用するだけで再生像を得ることができる．

以上で述べた手順に従い，参照光角度を 43° から 52° まで変化させて得られた再生像を Fig. 3.16 に示す．記録したときと同じ角度 45° と 50° のときに「ST」と「RL」像

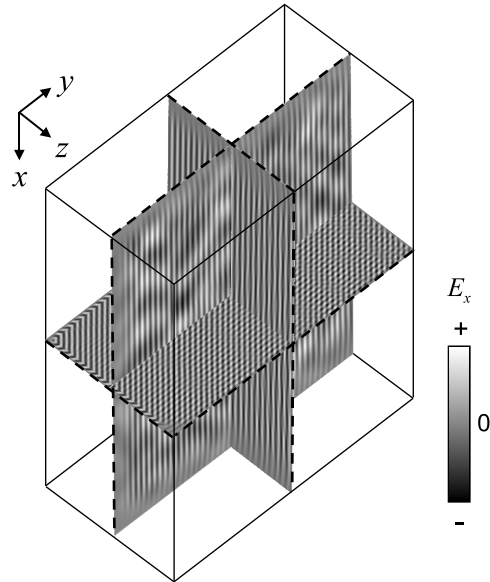


Fig. 3.15 Electric field distribution of x polarization calculated by FDTD method including the reference beam and the diffracted wave.

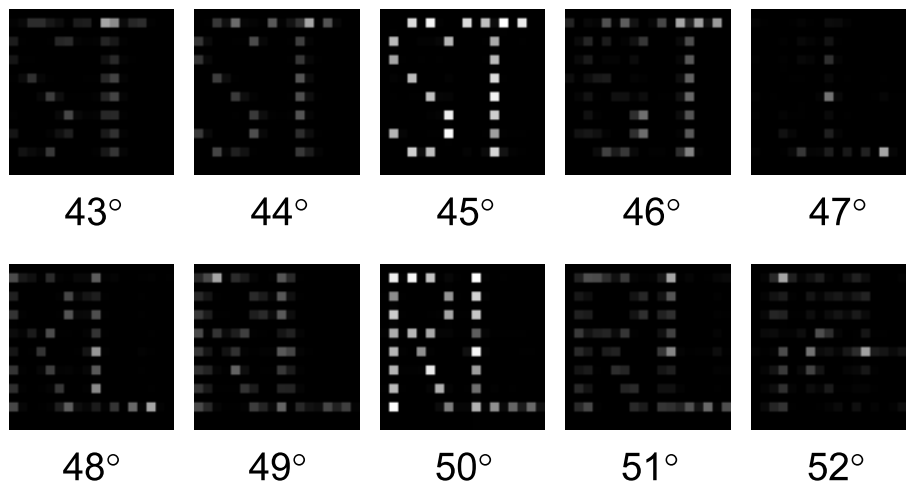


Fig. 3.16 Images reproduced at the reference beam angles from 43° to 52° .

がそれぞれ分離され正しい位置に再生されていることがわかる．その他の角度では像強度も弱く，位置ずれを生じている．シミュレーション結果は，角度選択性を持ってページデータが再生されることを示した．この例では二つのページデータが参照光角度間隔 5° で記録されているとしてシミュレーションを行っている．より狭い角度間隔で再生像を分離するためにはホログラムの厚さを増加すればよいが，その場合のシミュレーションには解析領域の拡大が必要となる．

有限差分時間領域法を用いたシミュレーションでは，

1. 二光束干渉縞計算からページデータが角度多重された媒体内誘電率分布を算出
2. 参照光を媒体へ照射し媒体内部の光波伝搬を有限差分時間領域法により計算
3. 得られた出力電磁界分布から再生像を求める

という一連の流れを採用した．角度多重記録再生シミュレーションの結果，二つのページデータが角度選択的に再生され，有限差分時間領域法を用いたシミュレーションの基本的動作を確認することができた．一般にホログラフィックメモリでは，記録後の媒体内部における誘電率分布が連続的に変化しかつ誘電率変調振幅が極めて小さい，という特徴を有する．これにより，セルの大きさが実効波長の $1/8.4$ 程度で定性的な特性を得られた．

本シミュレーションで用いた三次元有限差分時間領域法は，有限な三次元領域の問題を直接的また視覚的に解析することができる．三次元方向の電磁界6成分を用いたフルベクトル解析であることから，光の偏光を利用したホログラフィックメモリの解析にも適用可能である．また，解析対象の構造を記述しやすく，波源として平面波以外に球面，円筒面，あるいはRPMで変調された波面などを容易に与えることができる．さらに，回折光がホログラムで再回折する現象も厳密に再現する．従って，偏光の取り扱いや気泡などの媒体内欠陥，媒体の部分的体積収縮などの条件を加味した再生シミュレーションにも有効であり，解くべき問題によっては強力な解析手法となり得る．

フォトリソに記録する角度多重ホログラフィックメモリでは再生特性が偏光に大きく依存せず，また比誘電率の変調振幅が微小かつ緩やかである．この場合，再回折成分の大きさも極めて小さいことから，光波のフルベクトル解析でなくとも有効な解が得られる．そこで次節では光波を複素振幅で取り扱うスカラー回折理論によるシミュレーション手法について詳述する．

3.3 スカラー回折理論によるシミュレータ

スカラー回折理論に基づく手法 [19–22] は、媒質内の屈折率変調を計算機メモリ内に具体的に展開しこれに対する光波の相互作用を得るという点で、有限差分時間領域法に類似した手法であるといえる。有限差分時間領域法がフルベクトル解析であり、かつ解析領域を一度に計算機メモリ内に展開するのに対し、スカラー回折理論に基づく手法はスカラー量で光波を表現し、また解析領域を複数の層に分割して順次計算を進める。従ってスカラー回折理論に基づく手法は、偏光や回折光の再回折を扱わない問題に対して、有限差分時間領域法ほど大きな計算コストをかけずに解を得ることが可能である。以下ではシミュレーション手法の詳細と、今回新たに開発した傾斜媒体への対応手法について述べる。

3.3.1 シミュレーションモデルと定式化

ここでは、スカラー回折理論によるシミュレータが対象とするホログラフィックメモリをモデル化し、数値計算に必要な定式化を行う。

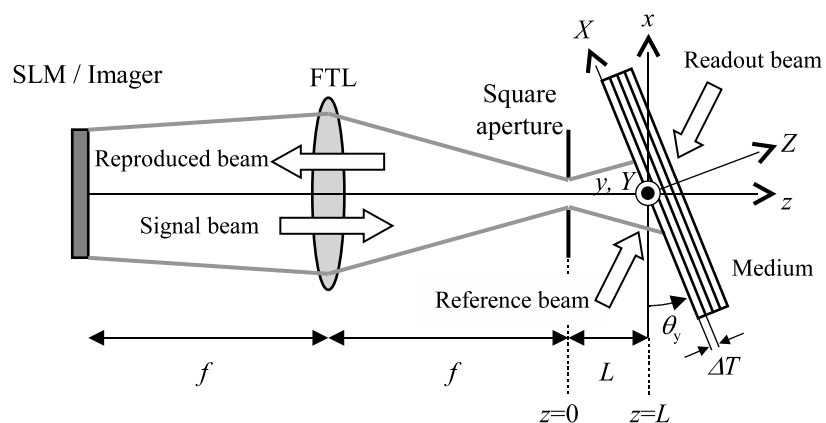


Fig. 3.17 Schematic diagram of simulation model based on the scalar diffraction theory for angle-multiplexed holographic memory with phase-conjugate readout.

Figure 3.17 に、スカラー回折理論によるシミュレーションモデルを図示する。信号光は SLM によりページデータで空間的に変調され、FTL と矩形開口を通過後、記録媒体へ照射される。記録時には参照光を FTL 側から照射し、再生時にはその逆側から媒

体へ照射する位相共役再生とし，再生光は信号光と逆方向に伝搬して矩形開口とFTLを通過後，SLMと同じ光路に配置された撮像素子に結像される．

角度多重方式では一般的に信号光軸に対し記録媒体を傾斜配置する必要がある．これは特にFTLの焦点距離が短い場合において，参照光の進入路を確保するためである．また2.3節で述べたように，参照光自体の角度を振る以外にも，記録媒体の傾斜角度自体を変化させて角度多重記録する方法があり，これに対応させるため記録媒体の傾斜配置をモデル化することは必須となる．

座標軸として信号光軸を z 軸とし， $x-z$ 面内で記録媒体を傾斜させるよう x, y, z 座標系を定める．また，記録媒体の記録層厚さ T を， ΔT の厚さをもつ薄い層に分割する．傾斜した記録媒体内部では，層の厚さ方向に Z ，面内方向に X, Y の座標系を新たに定める．ただし， $x-z$ 面内でのみ媒体傾斜させるものとするため， y と Y は同軸となる．

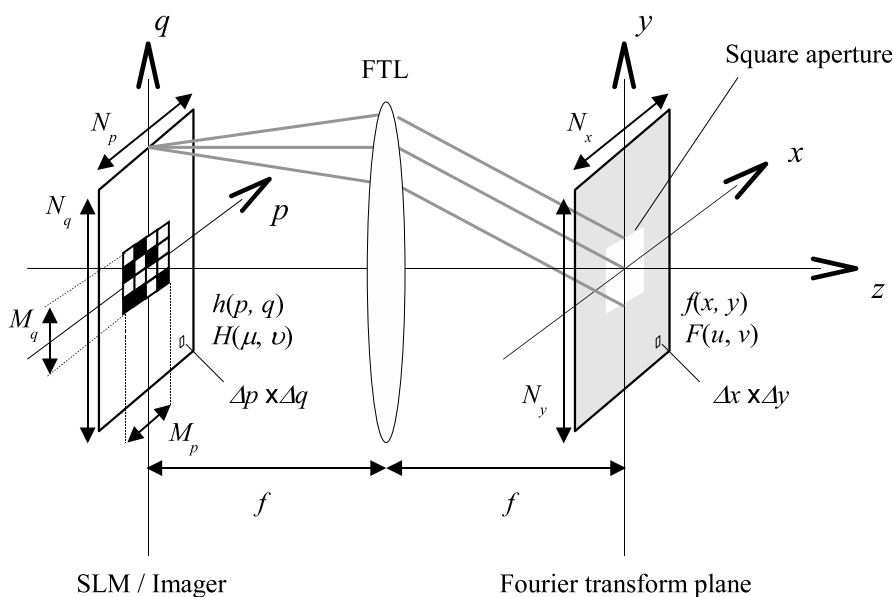


Fig. 3.18 Schematic diagram of optical Fourier transform.

まず，記録時の信号光の伝搬を記述する．Figure 3.18はSLM上に表示されたページデータのFTLによる光学的フーリエ変換を示す図である．SLMで空間的に変調された信号光は，Fig. 3.18の $p-q$ 面内からFTLを経由して光学的フーリエ変換面である $x-y$ 面に到達する．数値計算を行う上で， $p-q$ 面内におけるセル分割数を N_p, N_q と

し、セルの大きさを $\Delta p \times \Delta q$ とする。 $p-q$ 面内解析領域の大きさは $N_p \Delta p \times N_q \Delta q$ となる。また、ページデータの表示領域セル数を $M_p \times M_q$ と定める。

SLM からレンズを経由し目的の面まで光波伝搬させるには回折積分とレンズの位相変換作用を施す方法があるが、3.2.3 項で述べたようにループ演算により計算時間が膨大になる。従って、光学的フーリエ変換を数値計算するためには、FFT を用いる方法が現実的である。

Figure 3.18 中のフーリエ変換面 ($x-y$ 面) における光波分布 $f(x, y)$ は、SLM 面 ($p-q$ 面) の光波分布 $h(p, q)$ の空間スペクトル関数

$$H(\mu, \nu) = \mathcal{F}[h(p, q)] \quad (3.21)$$

から、 μ を x 、 ν を y と置くことで求められる。ただし、 \mathcal{F} はフーリエ変換を表す。また各々のセルの大きさ Δx と Δp 、 Δy と Δq の間には次のスケール変換を必要とする。

$$\Delta x = \frac{f\lambda}{N_p \Delta p}, \quad \Delta y = \frac{f\lambda}{N_q \Delta q} \quad (3.22)$$

フーリエ変換面には、Fig. 3.18 に示すとおり矩形開口を設ける。2.4 節で述べたとおり、ナイキスト空間周波数に対する倍率 χ を用いて、矩形開口面積は

$$S = \frac{(\chi f \lambda)^2}{N_o \Delta p N_o \Delta q} = \left(\frac{\chi f \lambda}{N_o} \right)^2 \frac{1}{\Delta p \Delta q} \quad (3.23)$$

と表せ、矩形開口以外の部分については光強度を強制的に 0 とすることで遮光マスクを表現する。 N_o はオーバーサンプル数であり、ページデータ上の一つの輝点を何セルで表現するか示すものである。

フーリエ変換面を基準面として、記録媒体までのオフセット距離 (Fig. 3.17 中の L) だけ、光波を伝搬させる必要がある。これには式 (3.17) ~ (3.20) で示したとおり、角スペクトル展開とそれらの伝搬を用いる。実際の数値計算では式 (3.17) と (3.20) におけるフーリエ変換または逆フーリエ変換を FFT または逆 FFT により実装する。すなわち、Fig. 3.18 におけるフーリエ変換面での光波 $f(x, y)$ をスペクトル関数 $F(u, \nu)$ に変換する作用は、

$$F(u, \nu) = \mathcal{F}[f(x, y)] \quad (3.24)$$

と記述できる．各スペクトル成分の距離 L の伝搬を表記すると，式 (3.18) と同様に

$$F(u, v; z = L) = F(u, v; z = 0) \exp \left\{ -jkL \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right\} \quad (3.25)$$

となる．ただし， $k = 2\pi/\lambda$ であり，

$$(\lambda u)^2 + (\lambda v)^2 \leq 1 \quad (3.26)$$

を満たす必要がある．また λ は実効波長であり，空気中の伝搬時と媒体中の伝搬時で値が異なることに注意する．最終的に L だけ伝搬した信号光の複素振幅は，逆フーリエ変換である \mathcal{F}^{-1} を用いて

$$f(x, y; z = L) = \mathcal{F}^{-1}[F(u, v; z = L)] \quad (3.27)$$

により得られる．

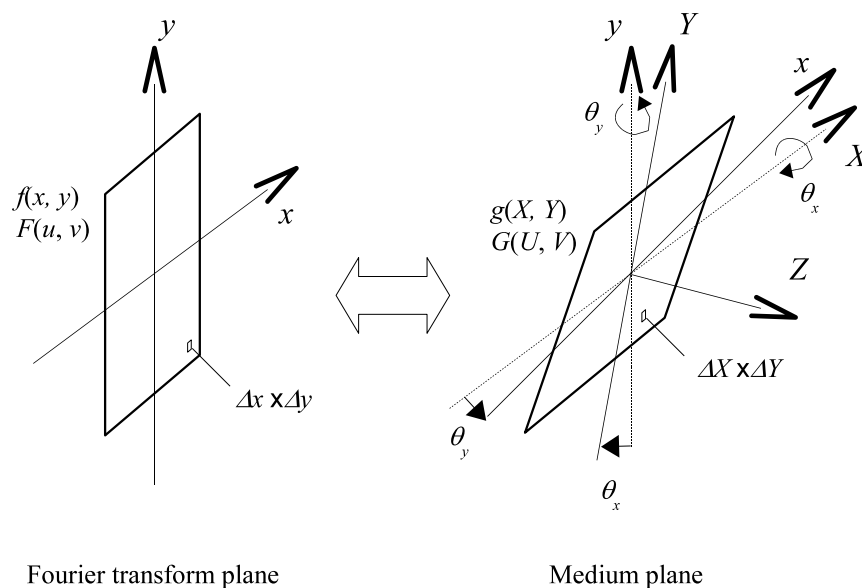


Fig. 3.19 Coordinate systems for rotational transform between Fourier transform plane and medium surface plane reciprocally.

次に，傾斜媒体中の層ごとの光波分布を求めるため，光波の傾斜変換 [37] について述べる．Figure 3.19 に示すとおり， $x-y$ 面内の光波分布 $f(x, y)$ とそのスペクトル関数 $F(u, v)$ を元に， x, y 軸まわりにそれぞれ θ_x, θ_y だけ回転した座標系 $X-Y$ 面上での光

波分布 $g(X, Y)$ およびそのスペクトル関数 $G(U, V)$ を求める。

具体的には，スペクトル関数 $F(u, v)$ と $G(U, V)$ を次式により相互に変換したのち，実空間座標系への変換に逆 FFT を用いればよい。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

ただし， $w = \sqrt{\lambda^{-2} - u^2 - v^2}$ ， $W = \sqrt{\lambda^{-2} - U^2 - V^2}$ であり，(3.26) と同時に $(\lambda U)^2 + (\lambda V)^2 \leq 1$ を満たす必要がある。T は次のとおり定義される回転変換行列である。

$$\mathbf{T} \equiv \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 \\ t_7 & t_8 & t_9 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

従って， U, V, W を用いて

$$u = t_1 U + t_2 V + t_3 W \quad (3.30)$$

$$v = t_4 U + t_5 V + t_6 W \quad (3.31)$$

と書け，これらを用いて $F(u, v)$ から $G(U, V)$ への変換は

$$G(U, V) = F(t_1 U + t_2 V + t_3 W, t_4 U + t_5 V + t_6 W) \cdot |\mathbf{J}(U, V)| \quad (3.32)$$

で与えられる。ただし，スペクトル座標系 (u, v) と (U, V) の変換は，両者のセル分割が一致しないため補間 (interpolation) が必要である。ここでは補間方法として bi-cubic 補間を用いる。また，J はヤコビアンであり，

$$\mathbf{J}(U, V) = \frac{(t_2 t_6 - t_3 t_5)U}{W} + \frac{(t_3 t_4 - t_1 t_6)V}{W} + (t_1 t_5 - t_2 t_4) \quad (3.33)$$

と表される。これは，フーリエ変換が二重積分を含むことからエネルギー保存のため必要となる。最終的に $G(U, V)$ を逆 FFT することにより $g(X, Y)$ を求めることができる。

軸 x と y について回転させる際，両者同時に行わなくとも一方ずつ順に回転変換を

実施すればよい。x軸まわりで θ_x だけ回転させる場合については

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\mathbf{J}_x(U, V) = \cos \theta_x + \frac{V}{W} \sin \theta_x \quad (3.35)$$

また、y軸まわりで θ_y だけ回転させる場合については

$$\mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{J}_y(U, V) = \cos \theta_y - \frac{U}{W} \sin \theta_y \quad (3.37)$$

となる。

新たに伝搬軸としてX-Y面に垂直なZ軸をとり、X-Y面内の光波分布 $g(X, Y)$ を、式(3.25)と同様にZ軸方向に光波伝搬させることで、記録媒体内部の信号光分布が得られる。以上が記録時の信号光算出プロセスである。

一方再生時の定式化は、第2章で述べた光波のスカラー表記と、それに基づくホログラフィー再生の原理で述べたように、式(2.17)~(2.23)を基本とする。参照光と信号光を同一波長(同一各周波数)としたとき、干渉縞の強度分布は時間項を省略して記述できるので、参照光と信号光をそれぞれスカラー波 $R(\mathbf{r})$ 、 $S(\mathbf{r})$ とすると、記録媒体のある層における干渉縞強度分布は式(2.19)より

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= |R(\mathbf{r}) + S(\mathbf{r})|^2 \\ &= |R(\mathbf{r})|^2 + |S(\mathbf{r})|^2 + R(\mathbf{r})S^*(\mathbf{r}) + S(\mathbf{r})R^*(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3.38)$$

となる。ただし、 \mathbf{r} は位置ベクトルである。第2章では銀塩乳剤などを用いた振幅ホログラムの例を挙げたが、一般的にフォトポリマー材料を用いたホログラフィックメモリは屈折率変調による位相ホログラムである。材料の平均屈折率 n_0 に対し、屈折率変

化が比例定数 n_1 で干渉縞強度 $I(\mathbf{r})$ に比例して生じるとすると、屈折率分布は

$$n(\mathbf{r}) = n_0 + n_1 I(\mathbf{r}) \quad (3.39)$$

と表すことができる．今、層分割された記録媒体の第 i 番目の層について注目し、そこでの屈折率分布 $n(\mathbf{r}_i)$ を読み出し参照光 $R'(\mathbf{r})$ で照明すると、第 i 層からの回折光は

$$\begin{aligned} D(\mathbf{r}_i) &= \exp\{jk\Delta t n(\mathbf{r}_i)\} R'(\mathbf{r}_i) \\ &= \exp[jk\Delta t \{n_0 + n_1 I(\mathbf{r}_i)\}] R'(\mathbf{r}_i) \\ &= \exp(jk\Delta t n_0) \exp\{jk\Delta t n_1 I(\mathbf{r}_i)\} R'(\mathbf{r}_i) \end{aligned} \quad (3.40)$$

と表される [21, 22]．ところで、 $\exp(jx)$ をテイラー展開すると

$$\begin{aligned} \exp(jx) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jx)^n}{n!} \\ &= 1 + jx + \frac{(jx)^2}{2} + \frac{(jx)^3}{3 \cdot 2} + \dots \end{aligned} \quad (3.41)$$

である． x が小さいとき式 (3.41) の右辺第二項まで採用することにより近似すれば、式 (3.40) を

$$D(\mathbf{r}_i) \approx \exp(jk\Delta t n_0) \{1 + jk\Delta t n_1 I(\mathbf{r}_i)\} R'(\mathbf{r}_i) \quad (3.42)$$

と表すことができる．ただしこれが成立するのは $1 \gg k\Delta t n_1 I(\mathbf{r}_i)$ の場合であるが、厚いホログラムすなわち体積ホログラムにおいてある一定の強い回折効率が得られる場合でも、層分割して考えたときの 1 層あたりの屈折率変化は小さいので、この条件を満足する．式 (3.42) に式 (3.38) を代入すると

$$D(\mathbf{r}_i) \approx \exp(jk\Delta t n_0) \left[1 + jk\Delta t n_1 \left\{ |R(\mathbf{r})|^2 + |S(\mathbf{r})|^2 + R(\mathbf{r})S^*(\mathbf{r}) + S(\mathbf{r})R^*(\mathbf{r}) \right\} \right] R'(\mathbf{r}_i) \quad (3.43)$$

となり、よって

$$\begin{aligned} D(\mathbf{r}_i) &\approx \exp(jk\Delta t n_0) \left[1 + jk\Delta t n_1 \left\{ |R(\mathbf{r})|^2 + |S(\mathbf{r})|^2 \right\} \right] R'(\mathbf{r}_i) \\ &\quad + \exp(jk\Delta t n_0) \cdot jk\Delta t n_1 R(\mathbf{r})S^*(\mathbf{r})R'(\mathbf{r}_i) \\ &\quad + \exp(jk\Delta t n_0) \cdot jk\Delta t n_1 S(\mathbf{r})R^*(\mathbf{r})R'(\mathbf{r}_i) \end{aligned} \quad (3.44)$$

を得る．右辺第 1 項は R' と同じ波面をもち、ホログラムを透過して直進する参照光

を表す．第2項は読み出し参照光 R' として R の位相共役波である R^* を採用した場合 ($R' = R^*$) に S^* が再生されるため，位相共役再生を表す．また，第3項は記録時と同じ R を読み出し参照光として採用した場合， S が再生されるため，通常再生時を表す．実際の数値計算においては，位相共役再生では第2項を，通常再生では第3項のみを計算する．特に， R' と R^* が単純な平面波として解析的に与えられているときには，第2項または第3項における S^* または S に対し，複素関数を乗算すればよいことがわかる．

上記のとおり，分割された媒体記録層内の全ての層について第 i 層での回折光分布が得られたのち，それらを基準面まで光伝搬させ，基準面上で位相を含めた積算をすることで，体積全体からの再生波を得ることができる．

角度多重で M 多重されている場合，記録媒体中の屈折率分布は式 (3.39) より

$$n(\mathbf{r}) = n_0 + \sum_{m=1}^M n_m I_m(\mathbf{r}) \quad (3.45)$$

と書ける．また，式 (3.40) は

$$D(\mathbf{r}_i) = \exp(jk\Delta t n_0) \exp \left\{ jk\Delta t \sum_{m=1}^M n_m I_m(\mathbf{r}) \right\} R'(\mathbf{r}_i) \quad (3.46)$$

となる．この場合にも，合算された屈折率変調が小さくテイラー展開による近似を用いることとし，また簡便のため全ての m について $n_m = n_1$ とする．再生光に寄与する成分を考えると，位相共役再生時には

$$D(\mathbf{r}_i) \approx \exp(jk\Delta t n_0) \cdot jk\Delta t n_1 \sum_{m=1}^M R_m(\mathbf{r}) S_m^*(\mathbf{r}) R'(\mathbf{r}_i) \quad (3.47)$$

また，通常再生時には

$$D(\mathbf{r}_i) \approx \exp(jk\Delta t n_0) \cdot jk\Delta t n_1 \sum_{m=1}^M S_m(\mathbf{r}) R_m^*(\mathbf{r}) R'(\mathbf{r}_i) \quad (3.48)$$

を得る．

以上の記録過程，再生過程を流れ図として Fig. 3.20 に示す．

まず，計算機メモリ内で二次元の解析領域セル配列を確保したうえで，SLM 上に表示されるページデータを構築し， $h(p, q)$ を得る．式 (3.21) を FFT により，また式 (3.22) で示したスケール変換ののち，光学的フーリエ変換面での光波 $f(x, y)$ において，矩形

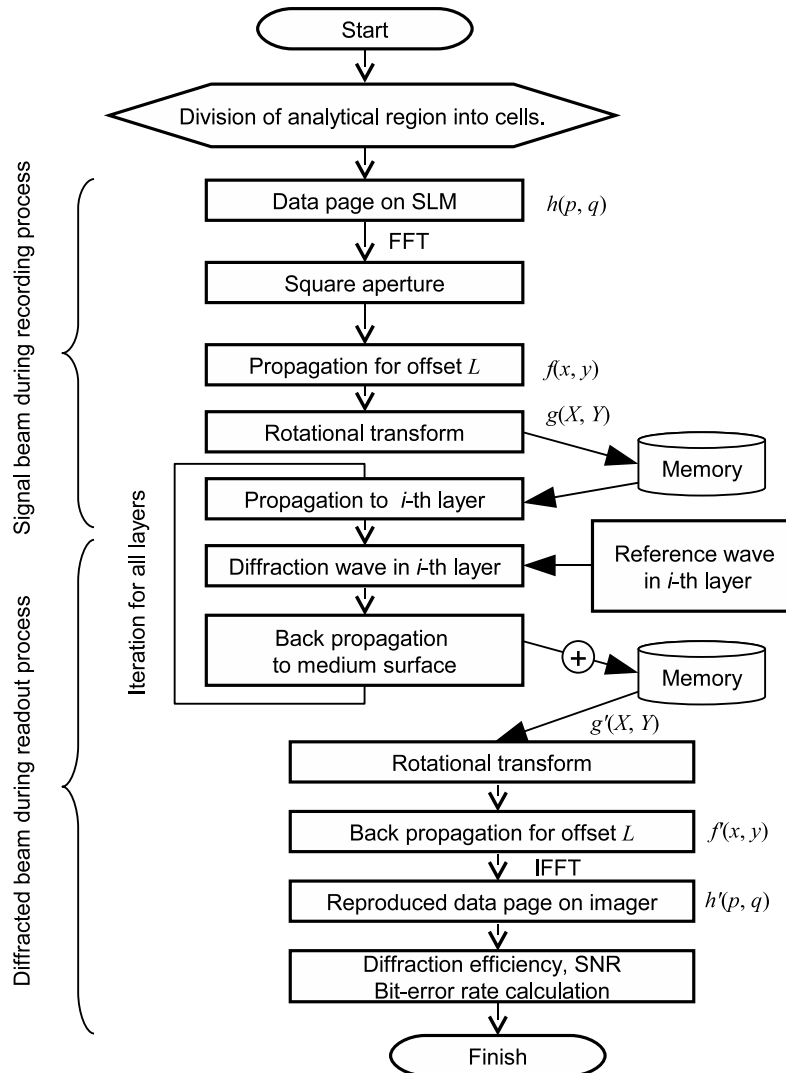


Fig. 3.20 Flow chart for numerical simulation based on the scalar diffraction theory.

開口の作用すなわち高空間周波数成分を除去する．次に，式 (3.25) によって光学的フーリエ変換面から媒体記録層表面までの距離 L だけ光波伝搬させ，さらに式 (3.32) に基づく回転変換により，傾斜媒体の記録層表面 (基準面) における光波 $g(X, Y)$ を得る．これを計算機メモリに格納し，各層での計算ごとに取り出して厚さ方向に光波伝搬させることにより第 i 層での信号光波面が得られる．

記録時と再生時の参照光を解析的に与え，式 (3.44) の右辺第 2 項を用いて第 i 層からの回折光を得る．この回折光は記録層表面まで逆伝搬させておき，計算機メモリ内に確保された回折光波の積算用配列に加算する．これを全ての層からの回折光について

Table 3.3 Parameters for numerical simulation based on the scalar diffraction theory.

Wavelength	λ
Focal length of FTL	f
Thickness of recording layer	T
Average refractive index in recording layer	n_0
Maximum refractive index amplitude in recording layer	n_1
Oversampling rate	N_O
Number of cells in SLM / imager plane	$N_p \times N_q$
Number of cells for data page region	$M_p \times M_q$
Cell size in SLM / imager plane	$\Delta p \times \Delta q$
Number of cells in Fourier plane / medium surface	$N_x \times N_y$
Cell size in Fourier plane / medium surface	$\Delta x \times \Delta y$
Number of layers in recording layer	N_Z
Thickness of a layer	ΔT
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency	χ
Offset distance of medium surface from Fourier plane	L
Incident external angle of reference beam during recording	θ_R
Incident external angle of reference beam during readout	θ'_R
Tilt angle of medium	θ_m

計算したのち，最終的な回折光波 $g'(X, Y)$ を得る．回転変換，逆伝搬，逆 FFT を順に施すことで撮像素子上の再生ページデータが得られ，回折効率，BER を算出できる．

以上のスカラー回折理論に基づく数値シミュレーションで使用するパラメータを Table 3.3 にまとめた．

3.3.2 結合波理論との比較

ここでは，媒体傾斜を取り入れたスカラー回折理論に基づく数値シミュレーションと，Kogelnik の結合波理論 [1] とを比較することで，数値シミュレーションの妥当性

を検証する．

ホログラムとして，信号光，参照光とも $x-z$ 面内を伝搬軸とする平面波で記録された単一格子ベクトル \mathbf{K}_h をもつものを考える (Fig. 3.21)．ただし，媒体は信号光軸 (z 軸) に対し θ_m の角度だけ傾斜して配置されるものとする．このとき，結合波理論による回折効率 η は次式で与えられ，sinc 関数の 2 乗の形となる [1]．

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{\xi^2 + \gamma^2}}{1 + \frac{\xi^2}{\gamma^2}} = \left(\gamma \operatorname{sinc} \sqrt{\xi^2 + \gamma^2} \right)^2 \quad (3.49)$$

ただし， γ はホログラムの強さを表す定数であり，ここでは $\gamma = 0.01$ に設定する．また， ξ は

$$\xi = \frac{\Delta\theta KT \sin(\phi - \theta_{Rint})}{-2 \cos(2\phi - \theta_{Rint})} \quad (3.50)$$

で与えられる．ここで， T は媒体の記録層厚さ， ϕ は格子ベクトルが Z 軸となす角度， θ_{Rint} は記録時参照光 R の Z 軸に対する内部角度である．また， K は格子ベクトル \mathbf{K}_h の大きさであり，次式で表される．

$$K = |\mathbf{K}_h| = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3.51)$$

ここで， Λ は格子縞間隔であり，信号光 S の内部角度を θ_{Sint} として次式で与えられる．

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\left| 2 \sin \left(\frac{\theta_{Sint} - \theta_{Rint}}{2} \right) \right|} \quad (3.52)$$

参照光と信号光の内部角度は，屈折と媒体傾斜により外部角度と異なる値をとり，Snell の法則により算出する．式 (3.49) と (3.50) を用いて，参照光内部角度 $\theta'_{Rint} = \theta_{Rint} + \Delta\theta$ で再生した場合の回折効率を求めることができる．

次に，Fig. 3.21 の単一格子ベクトルをもつ傾斜配置されたホログラムについて，スカラー回折理論に基づくシミュレーションを説明する．

Figure 3.22 にシミュレーションモデルを示す．信号光として平面波を媒体へ入射させるためには SLM 上の中心点を輝点とし，FTL により平面波に変換すればよい．スカラー回折理論に基づくシミュレーションのためのパラメータを Table 3.4 に示す．

Figure 3.23 に，信号光，参照光とも平面波で記録したホログラムにおける角度選択曲

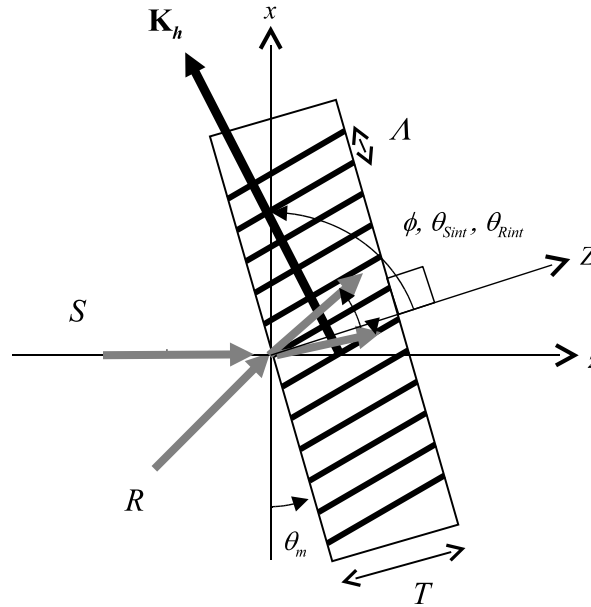


Fig. 3.21 Schematics and coordinate systems for simple slanted holographic grating.

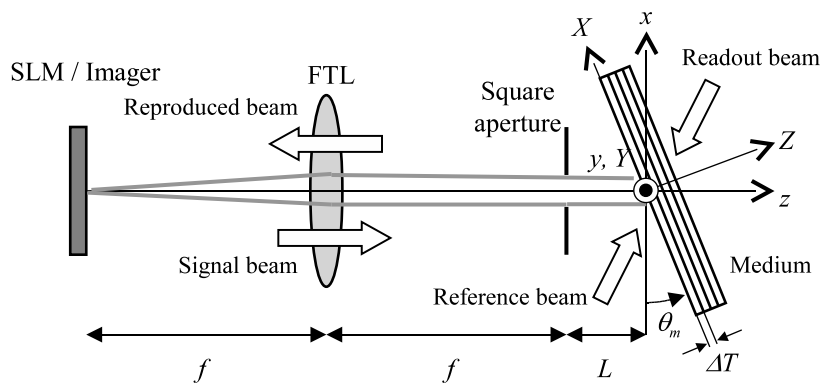


Fig. 3.22 Schematic diagram of simulation model for simple slanted holographic grating in tilted medium based on the scalar diffraction theory.

Table 3.4 Parameters for the scalar diffraction theory of a simple slanted holographic grating in tilted medium.

Wavelength in free space, λ	532 nm
Focal length of FTL, f	28.2 mm
Thickness of recording layer, T	1.0 mm
Average refractive index in recording layer, n_0	1.5
Maximum refractive index amplitude in recording layer, n_1	0.00001
Oversampling rate, N_O	3
Number of cells in SLM / imager plane, $N_p \times N_q$	2048 \times 2048
Number of cells for data page region, $M_p \times M_q$	3 \times 3
Cell size in SLM / imager plane, $\Delta p \times \Delta q$	28.0 \times 28.0 μm
Number of cells in Fourier plane / medium surface, $N_x \times N_y$	2048 \times 2048
Cell size in Fourier plane / medium surface, $\Delta x \times \Delta y$	0.2616 \times 0.2616 μm
Number of layers in recording layer, N_Z	1000
Thickness of a layer, ΔT	1.0 μm
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency, χ	2.0
Offset distance of medium surface from Fourier plane, L	0.0 mm
Incident external angle of reference beam during recording, θ_R	45 $^\circ$
Incident external angle of reference beam during readout, θ'_R	44.8 to 45.2 $^\circ$
Tilt angle of medium, θ_m	-10, 0, +30 $^\circ$

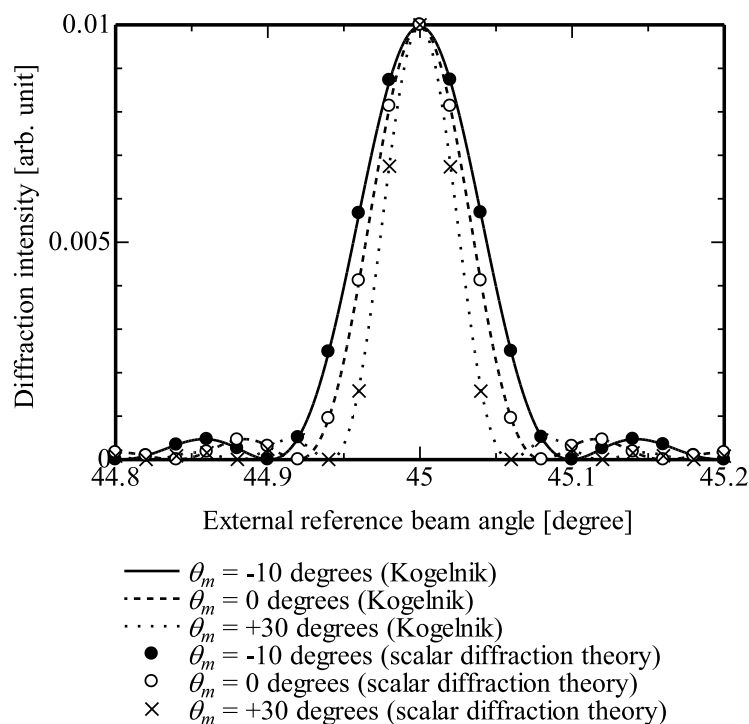


Fig. 3.23 Angular selectivity curves for various medium tilt angle using numerical simulations based on Kogelnik's coupled-wave theory and scalar diffraction theory.

線について，Kogelnik の結合波理論およびスカラー回折理論に基づく数値シミュレーションの結果を示す．縦軸の回折効率は両シミュレーション手法でピーク値を合わせるために規格化した．結合波理論を基準とし，これに対するスカラー回折理論に基づく数値シミュレーションの相対誤差を二乗平均平方根誤差 (RMSE : root mean square error) として計算したところ， θ_m が $-10, 0, +30^\circ$ でそれぞれ 0.030, 0.014, 0.36% であった．誤差の大きさは θ_m に依存しており，誤差要因として光波回轉變換における補間演算の精度が挙げられる．より高精度な解を必要とする問題に対しては，セル分割をさらに細かくして補間点を増すほか，Lanczos 補間などの高精度補間法を採用することが有効と考えられる．

媒体の傾斜角度に応じて角度選択曲線の半値幅が異なる，すなわち角度選択性が媒体傾斜角度に依存することがわかる．媒体傾斜角度 $\theta_m = 0^\circ$ は媒体が信号光軸に対して垂直に配置されていることを示し，これに比べ角度選択性は $\theta_m = -10^\circ$ で低く， $\theta_m = +30^\circ$

で高くなる。2.4 節でも述べたが、一般的に角度選択性が高い、つまり半値幅が狭いほど隣接するホログラムどうしの角度間隔を狭くして角度多重記録できるので高密度にすることができ、Fig. 3.23 に示した角度選択曲線は、実際の記録再生を行うための角度間隔を決定する際に重要な役割を果たす。特に、回折光強度のピークから角度変位を増すごとにその強度は低下してゆき、ある角度で回折光強度がほぼゼロとなる第一極小点が存在することは重要である。その後さらに角度変位を増すと回折光強度は再度増加をはじめるとサイドローブが存在し、第二極小点で再度その強度がほぼゼロとなる。理想的な状態では第一極小点に隣接ホログラムを配置できるが、実際にフォトポリマーへ多重記録した場合、重合反応に伴う体積収縮などが原因で理想状態の多重は現在のところ困難である。このような課題を踏まえた具体的な角度間隔の決定や、さらなる記録密度向上の手法について次章以降で述べる。

3.3.3 層分割数と解の精度

本シミュレーション手法において、光の伝搬軸に対し垂直となる面内ではサンプリング定理を満たすようセル分割しなければならない。もしサンプリング定理を満たさない場合は、高空間周波数成分が低周波数成分に重畳される折り返し歪みとして正しい結果が得られないため注意する必要がある。

一方、光の伝搬軸方向すなわち記録媒体の厚さ方向については、層分割数を多くするほど解の精度が高まることが媒体傾斜配置のない数値シミュレーションで確認されている [21]。そこで、媒体傾斜配置の場合において、どの程度の層分割数が必要かを本項で確認する。数値シミュレーションのパラメータを Table 3.5 に示す。

層分割数が 2, 5, 10, 1000 の場合における角度選択曲線の数値計算結果を Fig. 3.24 に示す。層分割数 2 と 5 の場合は誤差が極めて大きいですが、層分割数 10 では層分割数 1000 とのグラフ上の差異が小さい。

さらに詳細に収束を調べるため、層分割数 1000 の角度選択曲線を基準として、これに対する各層分割数のプロットの誤差を RMSE として計算した。層分割数に対する RMSE を Fig. 3.25 に示す。層分割数 1000 の角度選択曲線を基準として、誤差 1% 以下とするためには層分割数 70 以上、また誤差 0.1% 以下とするためには層分割数 200 以上であればよいといえる。

Table 3.5 Simulation parameters for a hologram modulated with a data page in tilted medium.

Wavelength in free space, λ	532 nm
Focal length of FTL, f	11.0 mm
Thickness of recording layer, T	1.0 mm
Average refractive index in recording layer, n_0	1.5
Maximum refractive index amplitude in recording layer, n_1	0.00001
Oversampling rate, N_O	6
Number of cells in SLM / imager plane, $N_p \times N_q$	4096 \times 4096
Number of cells for data page region, $M_p \times M_q$	2016 \times 2688
Cell size in SLM / imager plane, $\Delta p \times \Delta q$	5.2 \times 5.2 μm
Number of cells in Fourier plane / medium surface, $N_x \times N_y$	4096 \times 4096
Cell size in Fourier plane / medium surface, $\Delta x \times \Delta y$	0.2748 \times 0.2748 μm
Number of layers in recording layer, N_Z	2,5,10,20,50 100,200,500,1000
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency, χ	2.0
Offset distance of medium surface from Fourier plane, L	0.01 mm
Incident external angle of reference beam during recording, θ_R	75 $^\circ$
Incident external angle of reference beam during readout, θ'_R	74.6 to 75.4 $^\circ$
Tilt angle of medium, θ_m	+15 $^\circ$

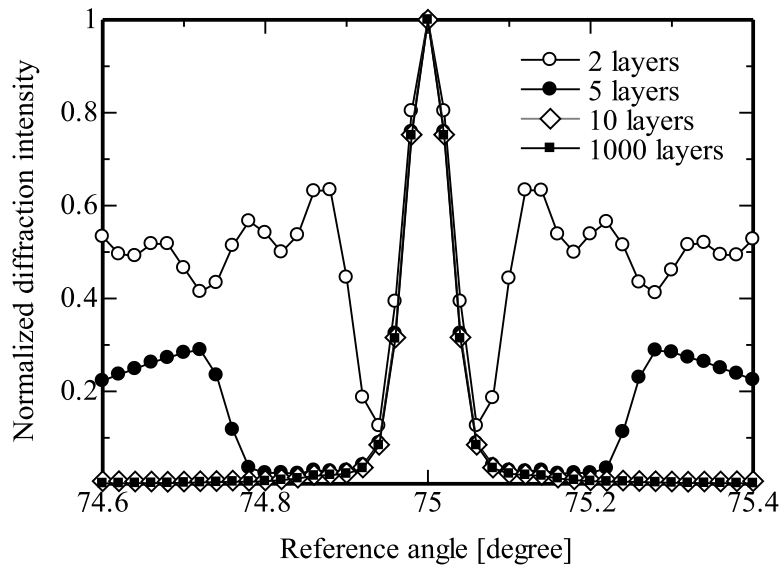


Fig. 3.24 Angular selectivity curves for various layer division number.

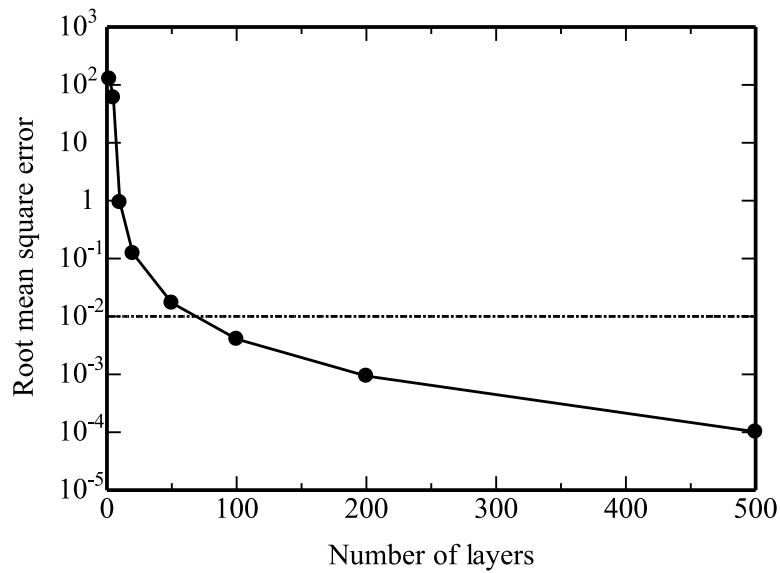


Fig. 3.25 Root mean square error of angular selectivity to 1000-layer-division result as function of layer division number.

3.4 結言

本章では計算機シミュレーション手法として有限差分時間領域法とスカラー回折理論に基づく手法の2つについて述べた。

有限差分時間領域法は時間領域で光波伝搬を逐次計算するものである。これまで有限差分時間領域法をホログラフィックメモリの解析に適用した例がなく、本研究においては新たに有限差分時間領域シミュレーション手法を確立した。古くから知られた厳密結合波解析と数値解析結果を比較したところ、2%以下の誤差であった。また、ホログラムすなわち干渉縞パターンの屈折率分布の中で光波がどのように伝搬・回折するか把握するために有用であることも確認された。

スカラー回折理論に基づく手法は、記録媒体をその厚さ方向に層分割し、各層での光波の回折を積算することにより再生光を求める手法である。有限差分時間領域法ほど計算機コストを必要とせず、大きな体積にわたるホログラムの解析を行うことができる。これまで信号光軸に対し傾斜配置された媒体を扱う手法が確立されていなかった。角度多重ホログラフィックメモリを扱う上で、傾斜配置された媒体への対応は必須であり、本研究では新たに光波の回転変換を適用させることで解決した。結合波理論との比較において最大でも0.36%の相対誤差であった。

有限差分時間領域法によるシミュレーション手法はフルベクトル解析かつ多重回折の扱いも可能であるため汎用性が高く、媒体に気泡などの欠陥がある場合や光の偏光を制御する場合などの特性解析に有効である。しかしながら汎用性と引き換えに計算量と計算機メモリ使用量が多い欠点がある。そこで本研究ではスカラー回折理論に基づく手法を数値シミュレーション手法として採用し、次章以降で実際の記録密度向上手法の検証に使用する。

参考文献

- [1] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *The Bell System Technical Journal*, Vol.48, pp.2909-2947, 1969.
- [2] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.71, pp.811-818, 1981.
- [3] M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.73, pp.1105-1112, 1983.
- [4] N. Kamiya, "Rigorous coupled-wave analysis for practical planar dielectric gratings: 1. Thickness-changed holograms and some characteristics of diffraction efficiency," *Applied Optics*, Vol.37, pp.5843-5853, 1998.
- [5] M. Nagayoshi, K. Oka, W. Klaus, Y. Komai, and K. Kodate, "Design and Evaluation of Color Separation Grating Using Rigorous Coupled Wave Analysis," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, pp.6670-6677, 2006.
- [6] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox (Eds.), "Holographic Data Storage," Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [7] G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," *Applied Optics*, Vol.35, pp.2403-2417, 1996.
- [8] 的場修, 三浦雅人, "ホログラフィックメモリの解析技術," *MATERIAL STAGE*, Vol.6, pp.35-42, 2006.
- [9] M. Miura, O. Matoba, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Image-based numerical evaluation techniques in volume holographic memory systems," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol.24, pp.792-798, 2007.
- [10] M. Miura, O. Matoba, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Three-dimensional shift selectivity in reflection-type holographic disk memory with speckle shift recording," *Applied Optics*, Vol.46, pp.1460-1466, 2007.
- [11] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Optics Letters*, Vol.31, pp.1208-1210, 2006.
- [12] 宇野亨, "FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析," コロナ社, 東京, 1998.
- [13] 木下延博, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, 中村昇一, "ホログラム記録における回折効率の FDTD 解析," *映像情報メディア学会年次大会講演予稿集*, 1-3, 2004.
- [14] 木下延博, 石井紀彦, 椎野弘崇, 清水直樹, 上條晃司, "ホログラム記録における角度選択性の FDTD 解析," *電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集*, C-3-81, p.213, 2004.
- [15] 木下延博, 椎野弘崇, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, "有限差分時間領域法のホログラム解析への適用," *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.104, MR2004-69(CPM2004-182), pp.43-47, 2005.

- [16] N. Kinoshita, N. Ishii, N. Shimidzu, K. Kamijo, and S. Nakamura, "3-D FDTD Simulation for Volume Holographic Gratings," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'04), We-G-10, pp.102-103, 2004.
- [17] N. Kinoshita, H. Shiino, N. Ishii, N. Shimidzu, and K. Kamijo, "Integrated Simulation Technique for Volume Holographic Memory Using Finite-Difference Time-Domain Method," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, pp.3503-3507, 2005.
- [18] 木下延博, "デジタルホログラム再生のFDTDシミュレーション," ホログラフィックメモリーのシステムと材料, 第5章第1節, シーエムシー出版, 東京, 2006.
- [19] S. R. Lambourdiere, A. Fukumoto, K. Tanaka, and K. Watanabe, "Simulation of Holographic Data Storage for the Optical Collinear System," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, pp.1246-1252, 2006.
- [20] 大沼宏和, 三浦雅人, 仁田功一, 的場修, 吉村武晃, "スカラー回折理論による反射型ホログラフィックディスクメモリの解析," レーザー学会学術講演会第27回年次大会講演予稿集, p.209, 2007.
- [21] 三浦雅人, "反射型ホログラフィックディスクメモリシステムの大容量記録方式に関する研究", 神戸大学大学院自然科学研究科博士論文, 2008.
- [22] M. Miura, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical estimation of storage capacity in reflection-type holographic disk memory with three-dimensional speckle-shift multiplexing," Journal of the Optical Society of America A, Vol.26, pp.2269-2274, 2009.
- [23] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.14, pp.302-307, 1966.
- [24] T. Baba and D. Ohsaki, "Interfaces of Photonic Crystals for High Efficiency Light Transmission," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.40, pp.5920-5924, 2001.
- [25] J. Liu, B. Xu, and T. C. Chong, "Three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Analysis of Optical Disk Storage System," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.39, pp.687-692, 2000.
- [26] J. M. Li, L. P. Shi, X. S. Miao, K. G. Lim, H. X. Yang, and T. C. Chong, "Integrated Thermal and Optical Analyses of Phase-Change Optical Disk," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, pp.4724-4729, 2004.
- [27] K. Kataja, J. Olkkonen, J. Aikio, and D. Howe, "Readout Modeling of Super Resolution Disks," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, pp.4718-4723, 2004.
- [28] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," Journal of Computational Physics, Vol.114, pp.185-200, 1994.
- [29] S.-D. Wu and E. N. Glytsis, "Finite-number-of-periods holographic gratings with finite-width incident beams: analysis using the finite-difference frequency-domain method," Journal of the Optical Society of America A, Vol.19, pp.2018-2029, 2002.
- [30] A. D. Papadopoulos and E. N. Glytsis, "Finite-difference-time-domain analysis of finite-number-of-periods holographic and surface-relief gratings," Applied Optics, Vol.47, pp.1981-1994, 2008.
- [31] N. Okada and J. B. Cole, "High-accuracy finite-difference time domain algorithm for the coupled wave equation," Journal of the Optical Society of America B, Vol.27, pp.1409-1413, 2010.
- [32] T. Hirono, W. Lui, S. Seki, Y. Yoshikuni, "A three-dimensional fourth-order finite-difference time-domain scheme using a symplectic integrator propagator," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.49, pp.1640-1648, 2001.

- [33] T. Hirono and Y. Yoshikuni, "Accurate modeling of dielectric interfaces by the effective permittivities for the fourth-order symplectic finite-difference time-domain method," *Applied Optics*, Vol.46, pp.1514-1524, 2007.
- [34] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics, 3rd ed.," Roberts & Company Publishers, Colorado, 2004.
- [35] M. Toishi, T. Tanaka, K. Watanabe, and K. Betsuyaku, "Analysis of Photopolymer Media of Holographic Data Storage Using Non-local Polymerization Driven Diffusion Model," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, pp.3438-3447, 2007.
- [36] S. Yoshida and M. Yamamoto, "Analysis of Diffraction Characteristics of Holographic Grating in Photopolymer Films by Beam Propagation Method," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, 03A027, 2009.
- [37] K. Matsushima, "Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography," *Applied Optics*, Vol.47, pp.D110-D116, 2008.

第4章 ページデータ間角度間隔制御による多重数増加

4.1 緒言

角度多重ホログラフィックメモリの記録密度向上には、角度多重数を増加させることが不可欠となる。

前章の3.3.2項で述べたとおり、媒体の傾斜角度に応じて角度選択曲線の半値幅が異なる。すなわち角度選択性が媒体傾斜角度または相対的な光の入射角度に依存する。一般的に角度選択性が高い、つまり半値幅が狭いほど隣接するホログラムどうしの角度間隔を狭くして角度多重記録できるので高密度にすることができる。

古くは、角度間隔を一定として角度多重するホログラフィックメモリが主流であった [1-3]。この場合、最も角度選択性の低いホログラムを基準として、広い角度間隔を設定しなければクロストークが生じる。従って、多重数の向上を阻害していた。

そこで、本研究ではホログラムの有する角度選択性が、媒体の傾斜角度もしくは光の入射角度に依存することを利用し、ホログラムごとに角度間隔を制御する手法を提案する [4,5]。

4.2 角度選択性の媒体角度依存性

ここでは、実際のページデータが記録された場合の角度選択性について、スカラー回折理論に基づく数値シミュレーションおよび実験により媒体角度依存性を調べる。記録再生実験装置は2.3節で述べたとおり、矩形開口を備え、位相共役再生を特徴とする角度多重ホログラフィックメモリであり、角度多重記録は信号光軸に対する媒体の傾斜角度を変化させながらホログラムを記録することにより行う。数値シミュレーションについても実験系に即した条件で行うものとする。

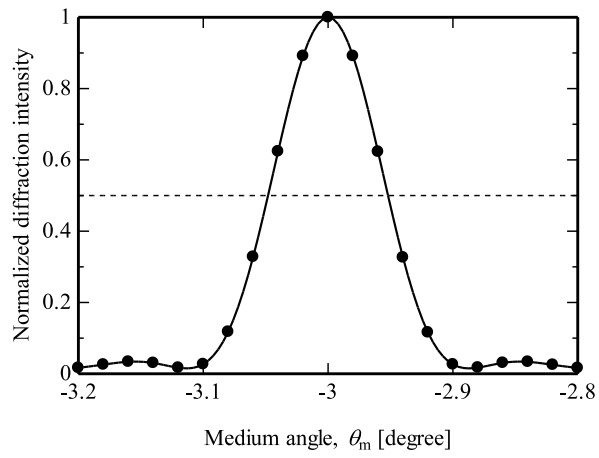
4.2.1 シミュレーション結果

まず，角度選択性を数値シミュレーションにより調べる．数値シミュレーションのためのパラメータを Table 4.1 に示す．

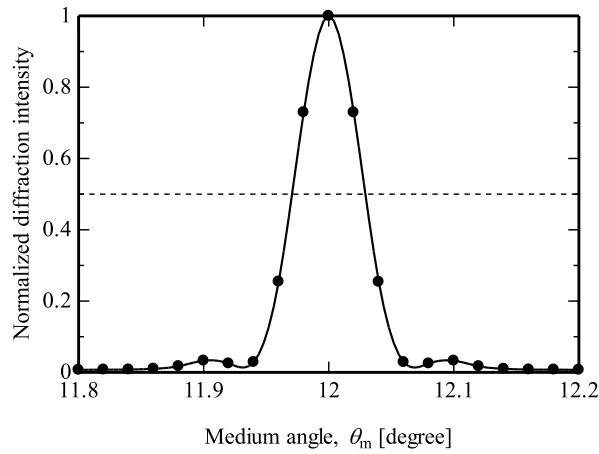
Table 4.1 Numerical parameters for a hologram modulated with a data page at medium tilt angles of (a) -3° , (b) $+12^\circ$, and (c) $+27^\circ$.

Wavelength in free space, λ	532 nm
Focal length of FTL, f	28.2 mm
Thickness of recording layer, T	1.0 mm
Average refractive index in recording layer, n_0	1.5
Maximum refractive index amplitude in recording layer, n_1	0.00001
Oversampling rate, N_O	8
Number of cells in SLM / imager plane, $N_p \times N_q$	8192×4096
Number of cells for data page region, $M_p \times M_q$	3584×2688
Cell size in SLM / imager plane, $\Delta p \times \Delta q$	$3.9 \times 3.9 \mu\text{m}$
Number of cells in Fourier plane / medium surface, $N_x \times N_y$	8192×4096
Cell size in Fourier plane / medium surface, $\Delta x \times \Delta y$	$0.4696 \times 0.9392 \mu\text{m}$
Number of layers in recording layer, N_Z	100
Thickness of a layer, ΔT	$10.0 \mu\text{m}$
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency, χ	2.0
Offset distance of medium surface from Fourier plane, L	-0.5 mm
Incident external angle of reference beam during recording, θ_R	65°
Tilt angle of medium, θ_m	$-3, +12, +27^\circ$
Tilt angle range of medium during readout	$\theta_m \pm 0.2^\circ$

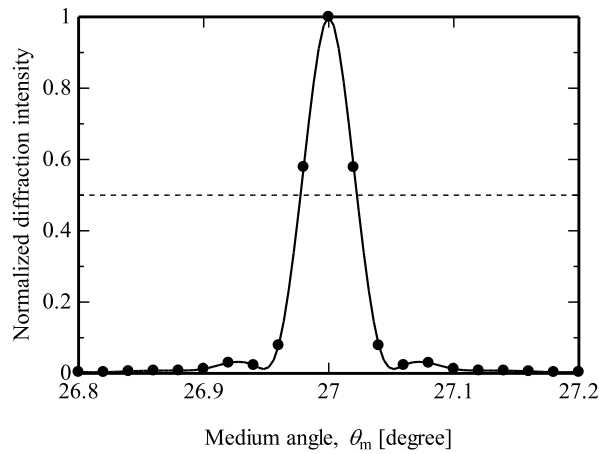
媒体の傾斜角度 θ_m が -3° , $+12^\circ$, $+27^\circ$ において，一つのページデータがホログラムとして記録された場合の角度選択曲線を Fig. 4.1 に示す．角度選択性は媒体傾斜角度に依存することがわかる．次にこれを実験により確認し，考察する．



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.1 Angular selectivity curves obtained from numerical simulation at the medium tilt angle of (a) -3° , (b) $+12^\circ$, and (c) $+27^\circ$.

4.2.2 実験測定結果

ここでは2.3節で説明した実験系を用いて、角度選択性の媒体傾斜角度との関係を実験的に調べる。

媒体の傾斜角度 θ_m は、信号光軸に垂直な面を 0° として -3° から $+27^\circ$ まで計 30° 回転させることができる。媒体の傾斜角度 θ_m が -3° , $+12^\circ$, $+27^\circ$ において、一つのページデータをホログラムとして記録したのち、モノマーを全て重合させるためにLEDにより post cure を行った。記録媒体として米国 InPhase Technologies 社のフォトポリマー媒体を準備した。実験により得られた角度選択曲線を Fig. 4.2 に示す。記録媒体の角度 θ_m を正の方向に増すに従い、角度選択曲線は鋭くなり、角度選択性が増すことがわかる。この傾向は数値シミュレーションの結果 Fig. 4.1 と同じ傾向を示す。しかしながら、数値シミュレーションとの明確な差異として、

1. 媒体角度が記録した際の角度 (-3° , $+12^\circ$, $+27^\circ$) とずれた位置に回折光強度のピークが存在する
2. 角度選択曲線が非対称である
3. 第一極小点において回折光強度が大きい

という点が挙げられる。

1. についての原因は、記録媒体において記録層を挟んでいる2枚のガラス板の平行度が挙げられる。位相共役再生の場合、記録媒体の無い状態で記録時と再生時の参照光軸が 180° の対向配置であったとしても、記録媒体の2枚のガラス板が平行に配置されていなければ、これが wedge plate として作用し、参照光の内部進入角度に誤差を生じさせる。従って、記録した際と異なる媒体傾斜角度でホログラム再生条件を満足することになる。実用上の対策として、記録媒体の平行度を向上させるとともに、記録再生装置側に角度誤差の検出および補正機構(サーボ機構)を備えるなど、これを解決するための幾つかの提案がなされている [6-8]。適正なサーボ機構を備え、角度補正がなされれば再生可能なことから、大きな問題とはならない。

2. と 3. については、記録材料としてフォトポリマーを用いた場合の重合反応に伴う体積収縮が原因として考えられる [9, 10]。特に Yonetani らの報告 [11] では、記録したホログラムに体積収縮が生じた場合の角度選択性の変化が詳細に解析されており、収

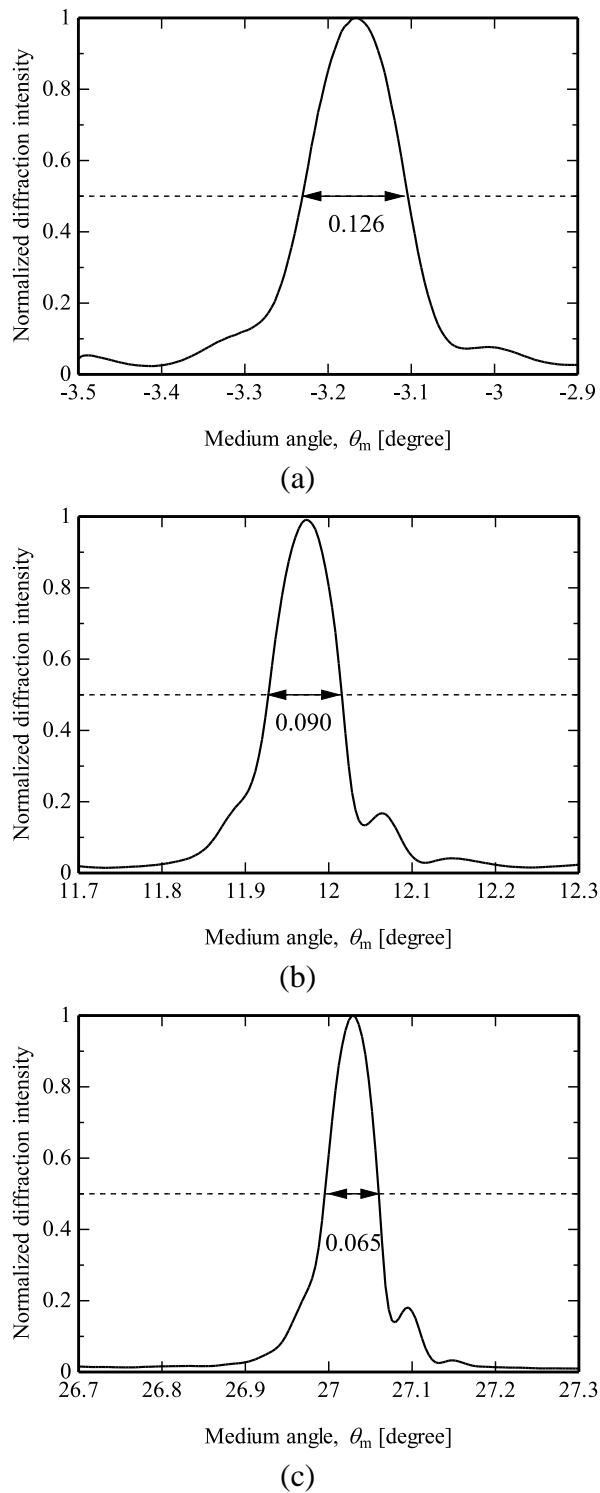


Fig. 4.2 Experimental results of angular selectivity curves at the medium tilt angle of around (a) -3° , (b) $+12^\circ$, and (c) $+27^\circ$.

縮率が 0.1% 以上の場合には角度選択曲線の非対称性と、第一極小点での回折光強度の上昇が報告されている。Figure 4.2 に示した本実験結果もこの傾向を示しており、ホログラム記録時のほか post cure での露光とそれに伴うモノマーの重合反応により、体積収縮を生じたと考えられる。

Figure 4.1 に示した角度選択曲線での第一極小点に隣接ホログラムを配置するものとして、角度間隔を理論計算により決定すればよい。しかしながら Fig. 4.2 の結果に見られるとおり、実際には第一極小点において回折効率が十分低くない場合があり、理論計算だけから最適な角度間隔を決定するのは困難である。そこで次節では角度選択曲線の半値幅と BER 実測値を用いた、ホログラムごとの角度間隔の制御について述べる。

4.3 角度間隔の適応制御

まず、従来の角度多重方式でも行われてきた角度間隔一定での記録再生を行い、BER を測定した。目標とする多重数は記録層厚さ $T = 1 \text{ mm}$ において $m_0 = 300$ 多重とした。

媒体は回転ステージにより計 30° 回転するので、多重数 300 で角度多重するために、角度方向に隣接するホログラム間隔を 0.1° 一定として記録再生した。得られた BER を Fig. 4.3 に示す。ページデータ番号の初期の部分、すなわち θ_m が -3° 付近でビット誤りが高いが、ページデータ番号が増すごと、すなわち θ_m が正の方向に回転するに従いビット誤りが減少し、ページデータ番号が後半のものについては一定の BER が得られており、BER が角度選択曲線に強く依存するといえる。前節での角度選択性の結果から明らかなように、ページデータ番号の初期の部分では角度選択性が低く、隣接するホログラムとのクロストークノイズが顕著であるためビット誤りが多く生じたと考えられる。

角度間隔一定で良好な BER を得るには従来、最も半値幅の広いホログラムによって角度間隔を決定しなければならず、例えば Fig. 4.2(a) $\theta_m = -3^\circ$ の半値幅 0.126° を角度間隔に採用して 300 多重した場合には、総計 37.8° の媒体角度範囲が必要となる。従って限られた媒体角度範囲において、より一層密に多くのホログラムを詰め込むには、隣接するホログラムとの角度間隔を制御することが必要となる。

そこで、角度間隔を制御するための記録スケジュールを定義し、これに基づく記録

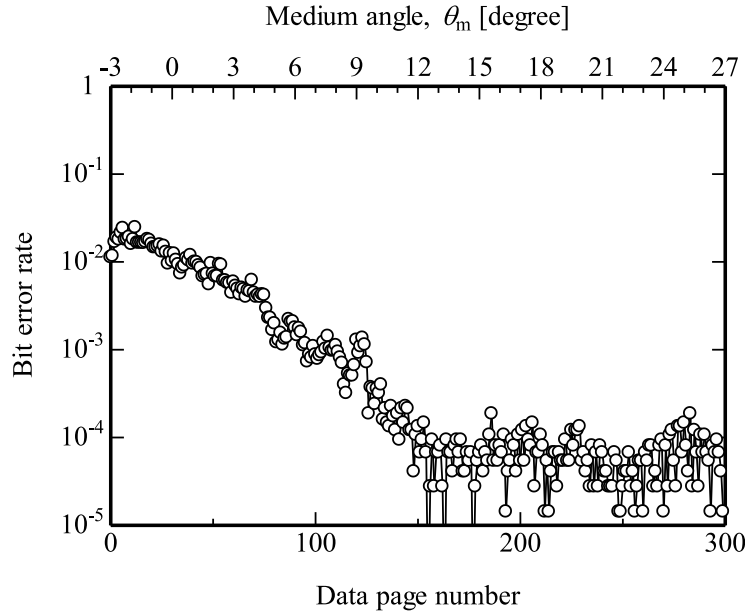


Fig. 4.3 Measured BERs without error correction using constant angular interval.

再生によりクロストークノイズを抑えたBER特性を得ることとした．前節で測定した角度選択曲線の半値幅に基づき，300個のページデータに対して隣接ホログラムとの角度間隔 $\Delta\theta_m$ を割り当てる． n 番目と $n+1$ 番目とのページデータにおける角度間隔 $\Delta\theta_m(n)$ は，三つの定点を通過する二次関数を用いて以下のように近似した．

$$\Delta\theta_m(n) \equiv \frac{2(s-2t+u)}{N^2}n^2 - \frac{3s-4t+u}{N}n + s \quad (4.1)$$

ここで， n は0から299までのページデータ番号， N はページデータの最大数299， s ， t ， u は三つの定数であり， $\Delta\theta_m(0)$ ， $\Delta\theta_m(149)$ ， $\Delta\theta_m(299)$ を表す．300個のページデータのために， $n=0\sim 298$ までの角度間隔を算出して使用する．

記録媒体が取り付けられた回転ステージはある角度分解能 $\Delta\theta_{res}$ で動作するため，その角度分解能以下の小さな角度までは再現できない．そこで次の関数を用いて，回転ステージへの指示角度 $\Delta\Phi_m(n)$ を決定した．

$$\Delta\Phi_m(n) = Round \left\{ \frac{\Delta\theta_m(n)}{\Delta\theta_{res}} \right\} \times \Delta\theta_{res} \quad (4.2)$$

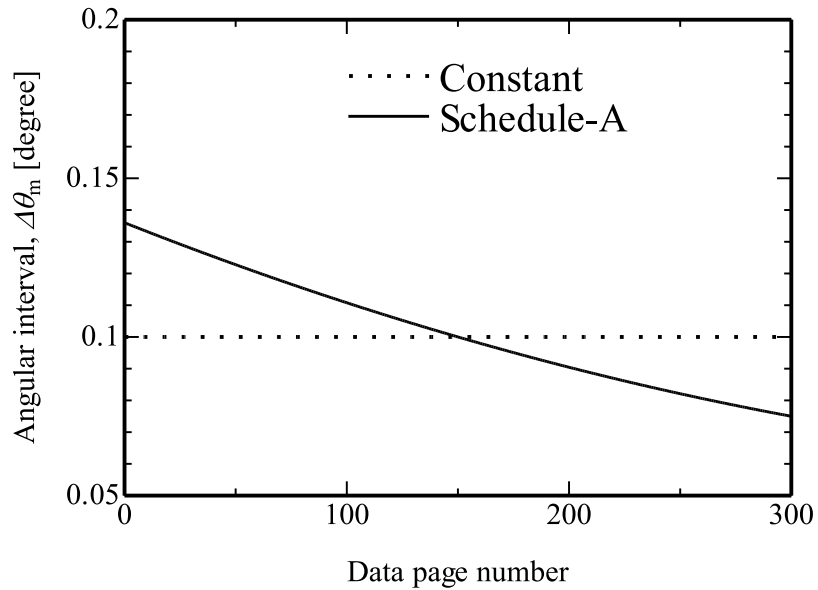


Fig. 4.4 Angular schedule-A.

ここで, $Round(x)$ は小数点以下の丸め関数, $\Delta\theta_{res}$ は本実験装置では 0.004° である. 式 (4.2) から, 記録媒体の角度移動量の総計は,

$$\Phi_{total} = \sum_{n=0}^{N-1} \Delta\Phi_m(n) \quad (4.3)$$

で与えられる.

Figure 4.4 に, ページデータ番号に対する角度間隔スケジュールを示す. 三つの定数 $s = \Delta\theta_m(0)$, $t = \Delta\theta_m(149)$, $u = \Delta\theta_m(299)$ を 0.136° , 0.100° , 0.075° にそれぞれ定めることにより, スケジュールを算出した. 但し式 (4.3) を考慮し, $\Delta\theta_m$ の積算が媒体角度範囲である 30° を超えないようにした.

角度間隔スケジュールに基づいて 300 枚のページデータを記録後, Fig. 4.5 に示す BER を得た. ページデータ番号の中盤では 10^{-5} 位の誤り率が得られている. しかしながら, ページデータ番号が初期の部分で確かに BER は低下したものの, BER の高い部分も見られる. またページデータ番号が 200 を超えると, BER は徐々に増加した. Figure 4.3 の一定角度間隔の場合にページデータ番号 200 以上で低い誤り率が得られていることから, 設定した角度間隔が狭すぎたものと考えられる. また, いずれも高

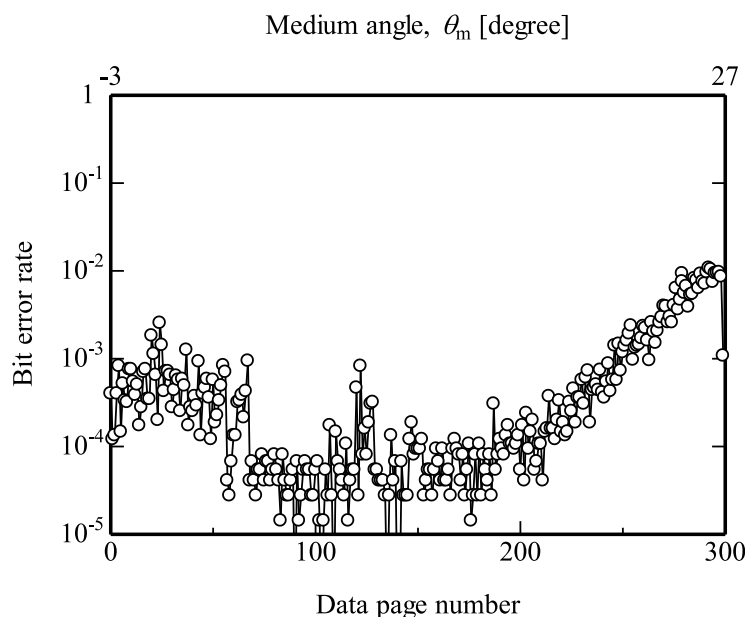


Fig. 4.5 Measured BERs without error correction using angular interval schedule-A.

い誤り率のところ、再生ページデータ画像には隣接ホログラムからのクロストークノイズが顕著に見られた。記録媒体の体積収縮によるクロストーク要因のため、角度選択曲線の第一極小点あるいは半値幅に基づく角度スケジュールでは、必ずしも十分でないことがわかる。以上の結果から、ビット誤りの多い部分についてクロストークノイズを軽減できるまで角度間隔を広げることで改善の可能性が期待できる。クロストークノイズによるビット誤りを低減し、 10^{-4} 台の十分低いBERを得るために、次に角度間隔スケジュールの補正を行う。

具体的には、ページデータ番号の最初 ($n = 0$) と最後 ($n = 299$) において角度間隔をより広く確保する。一方で、角度間隔の積算が媒体角度範囲である 30° を越えないよう、ページデータ番号の中盤 ($n = 149$) で角度間隔を狭くした。Figure 4.4 の角度間隔スケジュールを初期条件とし、式 (4.1) における s を 0.001° ずつ増加させ、角度総計 Φ_{total} が最大値を超えないよう t を 0.001° ずつ減少させ、新たな角度間隔スケジュールを用いて BER の測定を行った。ページデータ番号 0~49 において BER が 1.0×10^{-3} 以下となるところで s を確定した。同様にしてページデータ番号 250~299 において BER が 1.0×10^{-3} 以下となるまで、式 (4.1) における u を 0.001° ずつ増加させ、また t

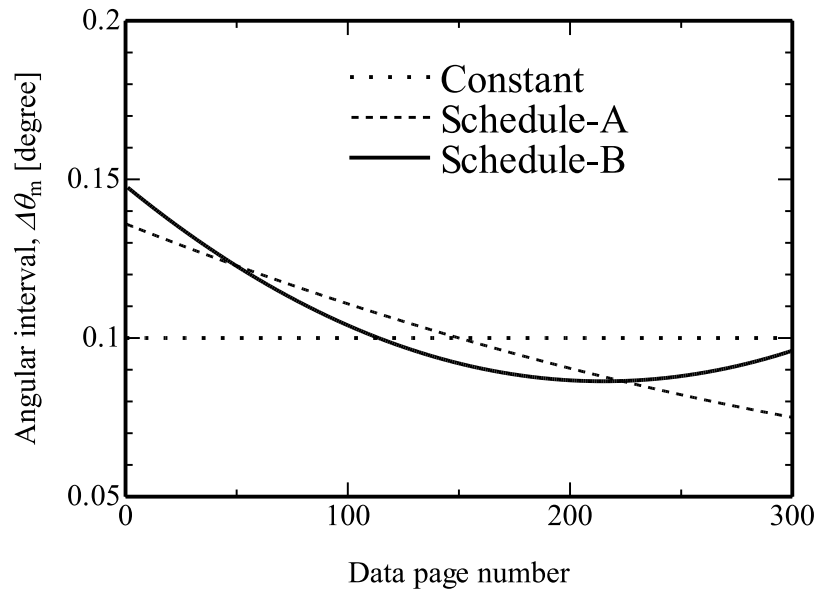


Fig. 4.6 Angular schedule-B.

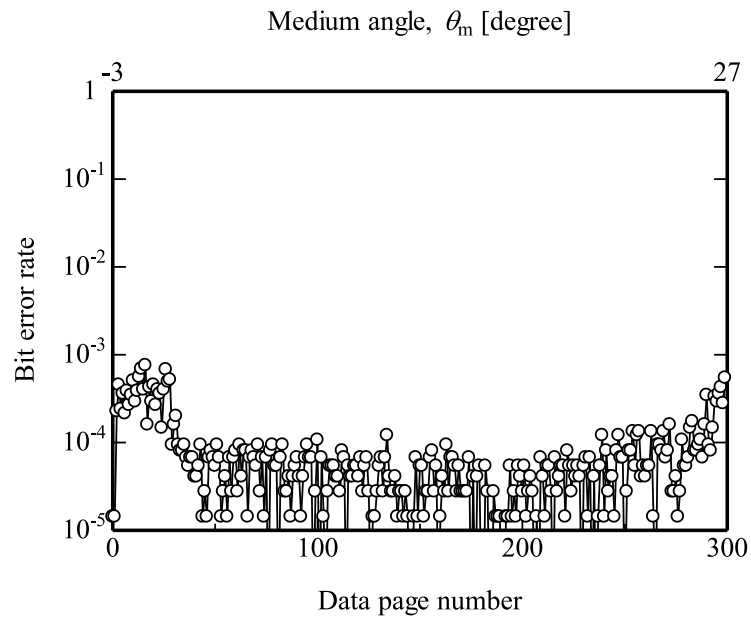


Fig. 4.7 Measured BERs without error correction using angular interval schedule-B.

を 0.001° ずつ減少させながら新たな角度間隔スケジュールを定義した。以上の操作により定数 s, t, u として $0.148^\circ, 0.092^\circ, 0.096^\circ$ がそれぞれ得られ、角度総計 ϕ_{total} は 29.88° となった。これによる角度間隔スケジュールを Fig. 4.6 に示す。求めた角度間隔スケジュールを用いて 300 多重記録における BER を測定したところ、Fig. 4.7 に示す結果が得られた。ページデータ番号の初期と終期においてクロストークノイズが残留しているため BER が比較的高いものの、全てのページデータで 10^{-4} 台以下の BER が得られた。

4.4 結言

媒体傾斜の角度範囲が制限された条件でホログラムを密に記録するための角度間隔制御を行った。これは、ホログラムの有する角度選択性が媒体の傾斜角度もしくは参照光の入射角度に依存することを利用したものである。

角度選択曲線の第一極小点に隣接ホログラムを配置するものとして、必要な角度間隔を数値計算により決定すればよい。そこでまず、ページデータが記録された場合の角度選択性について、スカラー回折理論に基づく数値シミュレーションにより媒体角度依存性を調べた。

次に、実験により角度選択曲線を測定したところ、数値シミュレーションと定性的に一致するものの差異がみられた。これはフォトポリマー材料の光重合反応に伴う体積収縮に起因するものと考えられる。このため第一極小点において回折効率が十分低くない場合があり、記録媒体の収縮モデルを用いない数値計算のみで最適な角度間隔を決定するのは困難であるとわかった。

そこで角度選択曲線の半値幅を元に、ホログラムごとの角度間隔スケジュールを近似関数により定義した。近似関数の各定数は、BER が目標値以下となるよう補正することにより最適化を図った。この結果、媒体厚さ $T = 1 \text{ mm}$ 、レーザー波長 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、角度多重数 $m_0 = 300$ という条件下で、全てのページデータにわたり 10^{-4} 台以下の BER を得ることに成功した。

参考文献

- [1] F. H. Mok, M. C. Tackitt, and H. M. Stoll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO_3 crystal," *Optics Letters*, Vol.16, pp.605-607, 1991.
- [2] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Optics Letters*, Vol.18, pp.915-917, 1993.
- [3] A. Pu and D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks," *Applied Optics*, Vol.35, pp.2389-2398, 1996.
- [4] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Angular interval scheduling for angle-multiplexed holographic data storage," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'08)*, TuP10, 2008.
- [5] 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*, Vol.48, 03A029, 2009.
- [6] S.-H. Kim, J. H. Kim, Y. H. Lee, H. Yang, J.-Y. Park, and Y.-P. Park, "Tilt Error Measurement and Compensation Method for the Holographic Data Storage System," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'08)*, TuP07, pp.241-243, 2008.
- [7] M. R. Ayres, A. Hoskins, P. C. Smith, and J. Kane, "Wobble alignment for angularly multiplexed holograms," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'08)*, ThC01, pp.460-462, 2008.
- [8] 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*, Vol.46, pp.3837-3839, 2007.
- [9] R. M. Shelby, D. A. Waldman, and R. T. Ingwall, "Distortions in pixel-matched holographic data storage due to lateral dimensional change of photopolymer storage media," *Optics Letters*, Vol.25, pp.713-715, 2000.
- [10] J. T. Gallo and C. M. Verber, "Model for the effects of material shrinkage on volume holograms," *Applied Optics*, Vol.33, pp.6797-6804, 1994.
- [11] Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical evaluation of angular multiplexing in reflection-type holographic data storage in photopolymer with shrinkage," *Applied Optics*, Vol.49, pp.694-700, 2010.

第5章 ページデータ内角度間隔制御による多重数増加

5.1 緒言

前章では、角度多重ホログラフィックメモリにおいて参照光の入射角度あるいは記録媒体の角度に応じ、隣接するホログラムとの角度間隔を適応制御する手法について述べた。記録密度をさらに向上させるには、第2章で述べたように、光源の短波長化や記録層厚さの増加とともに、FTLの短焦点距離化も有効である。FTLの短焦点距離化を進めた場合、記録媒体へ入射する信号光の収束角度または発散角度が増大するため新たな課題が生じ、その補償のための多重数増加手法が求められる。

レンズを通じて収束または発散しながら記録媒体へ照射される信号光は、様々な入射角度を有する素平面波の集合であるとみなすことができる [1–3]。この場合、それぞれの素平面波ごとに最適な角度間隔が異なると考えられる。特にFTLの焦点距離が短い場合、収束角度または発散角度が大きいため、広範囲の素平面波集合に対して最適な角度間隔を考慮する必要がある。そこで本章では、ページデータ内の場所ごとに複数の最適角度間隔が存在することを利用した記録密度向上手法 [4–6] を提案し、その有効性を実証する。

5.2 半ページ挿入法

角度多重方式における記録密度が式 (2.24) で与えられることは既に述べた。角度多重数 m を増加させるためには、参照光または媒体の角度範囲内で多くのページデータを記録すればよく、このための最適化手法の一つとして、前章で角度間隔の適応制御手法について述べた。

矩形開口面積 S はFTLの焦点距離 f の2乗に比例するため、焦点距離を短くするこ

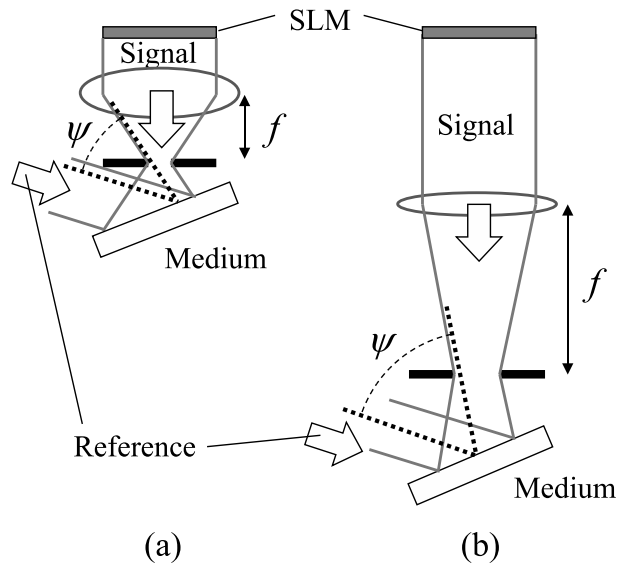


Fig. 5.1 Schematic diagram of signal and reference beams in angular multiplexing holographic memory with (a) short and (b) long focal length lens system.

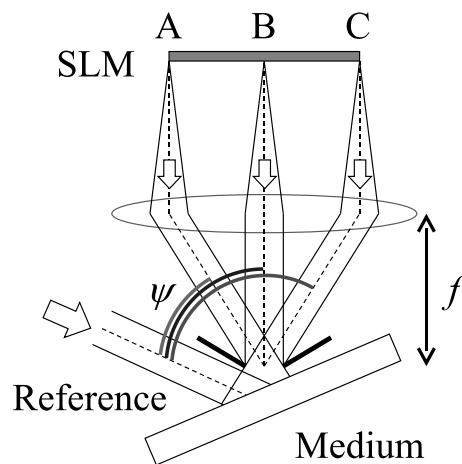


Fig. 5.2 Angles between reference beam and three elemental plane waves from point-A, -B, and -C on SLM.

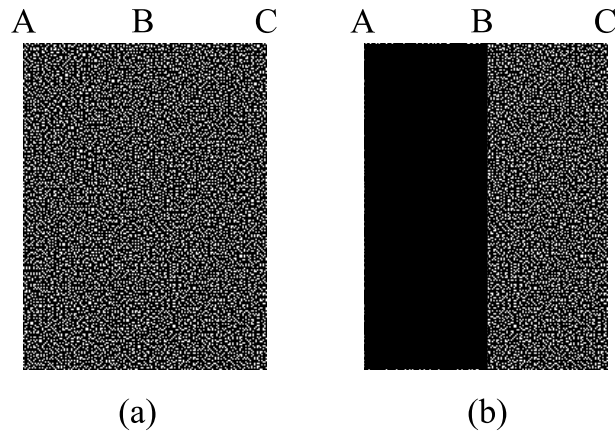


Fig. 5.3 (a) full and (b) half format data page.

とが記録密度の向上に有効である．焦点距離 f の異なるレンズ系を用いた場合の信号光と参照光の配置図を Fig. 5.1 に示す．SLM の大きさを一定としたとき，短焦点距離化により信号光の収束角度または発散角度が増加する．信号光は媒体への入射角度の異なる様々な素平面波の集合として表現できるので，参照光となす角度が最も小さな素平面波については，短焦点距離化によりそのなす角度 ψ が小さくなる．簡便のため，SLM 上の 3 点 A,B,C から出射された光が FTL により入射角度の異なる素平面波として媒体へ照射された場合を考え，このときの信号光と参照光の配置を Fig. 5.2 に示す．

Kogelnik の結合波理論 [7] によれば，参照光となす角度 ψ が小さいほど角度選択性は低くなる．点 A からの素平面波は最も角度選択性が低く，クロストークを避けるため従来は点 A の角度選択性に基づいて隣接ホログラムとの角度間隔を広く確保せざるを得なかった．一方，点 B, C からの素平面波の角度選択性は点 A のものより高いので，B-C 間に配置されたページデータに関しては，従来よりも角度間隔を狭くして多重できる可能性がある．

そこで Fig. 5.3 に示すような，データ含有領域の大きさを変えた 2 つのページデータを準備し，これらを交互に角度多重記録する手法を提案する．すなわち，従来は A-C 間にデータを有する Fig. 5.3(a) full format のページデータを点 A からの素平面波で決定された角度間隔にて多重していたが，本提案手法はそれら full format ページデータのホログラム間に Fig. 5.3(b) half format のページデータをホログラムとして角度的に挿入するものであるから，多重数増加と記録密度向上が期待できる．次節では提案手法の実現可能性について，数値シミュレーションにより検証する．

5.3 数値シミュレーションによる角度間隔の見積り

本節では，full format ページデータ間に half format ページデータを挿入する半ページ挿入法において，それぞれのページデータがホログラムとして記録された場合の角度選択性から，どの程度の角度間隔を確保すればよいかスカラー回折理論に基づく数値シミュレーションにより調べる．Table 5.1 にシミュレーションパラメータを示す．

Table 5.1 Numerical parameters for angular interval estimation.

Wavelength in free space, λ	532 nm
Focal length of FTL, f	11.0 mm
Thickness of recording layer, T	1.0 mm
Average refractive index in recording layer, n_0	1.5
Maximum refractive index amplitude in recording layer, n_1	0.00001
Oversampling rate, N_O	8
Number of cells in SLM / imager plane, $N_p \times N_q$	4096 \times 4096
Number of cells for data page region, $M_p \times M_q$	2688 \times 3584
Cell size in SLM / imager plane, $\Delta p \times \Delta q$	3.9 \times 3.9 μm
Number of cells in Fourier plane / medium surface, $N_x \times N_y$	4096 \times 4096
Cell size in Fourier plane / medium surface, $\Delta x \times \Delta y$	0.3663 \times 0.3663 μm
Number of layers in recording layer, N_Z	200
Thickness of a layer, ΔT	5.0 μm
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency, χ	2.0
Offset distance of medium surface from Fourier plane, L	-0.5 mm
Incident external angle of reference beam during recording, θ_R	75 $^\circ$
Tilt angle of medium, θ_m	+15 $^\circ$
Tilt angle range of medium during readout, θ'_R	$\theta_m \pm 0.2^\circ$

5.3.1 角度選択性

多重は行わずに full または half format のページデータを一つだけホログラムとして記録した場合の角度選択性を数値計算により求めた。

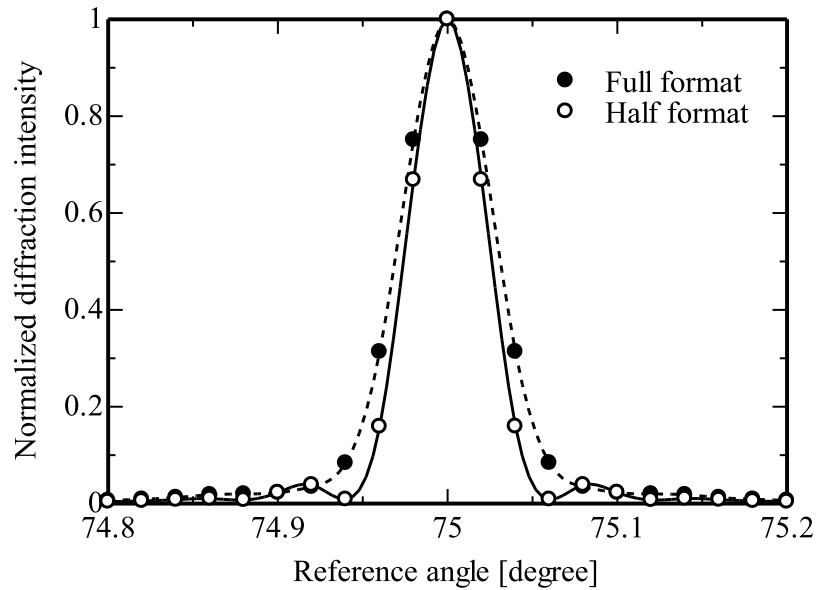
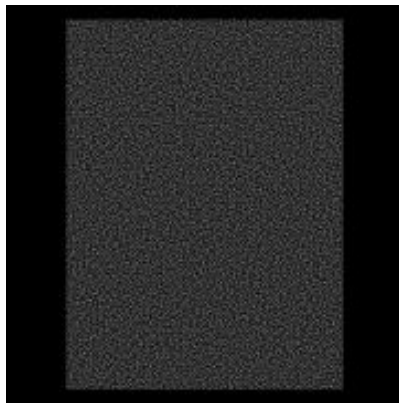


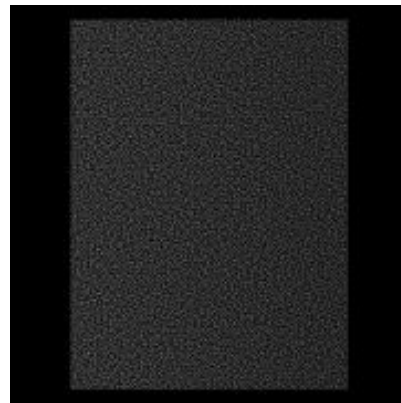
Fig. 5.4 Angular selectivity curves obtained from numerical simulation for (a) full and (b) half format data pages.

Figure 5.4 に、再生時の参照光角度に対する規格化した回折強度を表す。角度選択性は full format よりも half format のほうが高い。また、half format の場合には第一極小点が明確に現れているが、full format の場合には記録時角度からの変位が大きくなるほど回折強度はなだらかな減少となり、第一極小点は明確には出現していない。これは full format における信号光がより多くの素平面波で構成され、かつそれぞれの素平面波の第一極小点が一致せずに積算されているためと考えられる。

Figure 5.5 は、full format のページデータが記録されており参照光角度 θ'_R を 75.0° から 75.1° まで変化させて再生した場合について、数値計算により得られた再生ページデータ像である。記録時と同じ参照光角度すなわち $\theta'_R = \theta_R = 75.0^\circ$ の場合は完全にページデータが再生されており、参照光角度をずらすにつれて再生ページデータの輝



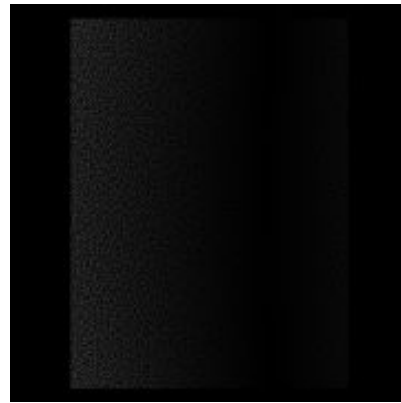
(a) $\theta'_R = 75.00^\circ$



(b) $\theta'_R = 75.02^\circ$



(c) $\theta'_R = 75.04^\circ$



(d) $\theta'_R = 75.06^\circ$



(e) $\theta'_R = 75.08^\circ$



(f) $\theta'_R = 75.10^\circ$

Fig. 5.5 Numerical results for the reproduced data pages at various external incident angles of the reference beam.

度は低下する．また，その輝度低下度合いがページデータの場所ごとに異なり，このことから Fig. 5.3 中の点 A と C で角度選択性に差異を生じることがわかる．

Figure 5.4 より，half format のページデータを並べるには，第一極小点に基づき 0.06° の角度間隔でよいことがわかる．しかしながら，full format については，なだらかな減少を示すため角度選択曲線からだけでは角度間隔を決定できない．そこで次に，隣接ホログラムからのクロストーク量を考慮に入れた数値シミュレーションにより，所望の角度間隔を見積る．

5.3.2 角度間隔に対する信号対雑音比

ここでは，full format ページデータを記録した 1 つのホログラム (ターゲットホログラム) が記録時参照光角度 $\theta_R = 75.0^\circ$ で記録されており，その角度方向の両側に full または half format のページデータが角度間隔 $\Delta\theta$ で一つずつ記録されている場合， $\Delta\theta$ に応じてターゲットホログラムの再生信号品質がどのように変化するかを数値解析する．すなわち 3 多重時の角度間隔に対するターゲットホログラムの信号対雑音比 (SNR : signal-to-noise ratio) を調べる．SNR は次式により算出した [8, 9] ．

$$SNR = \frac{\mu_{ON} - \mu_{OFF}}{\sqrt{\sigma_{ON}^2 + \sigma_{OFF}^2}} \quad (5.1)$$

ここで， μ_{ON} と μ_{OFF} はそれぞれ白信号と黒信号に関する輝度ヒストグラムでの平均値， σ_{ON} と σ_{OFF} はそれぞれの標準偏差である．

Figure 5.6 のように，ターゲットホログラムの角度的な両隣には full または half format のページデータを記録するものとした．また各ページデータは 2:4 符号で構成した．

Figure 5.7 に $\Delta\theta$ を変化させたときの，ターゲットホログラムの SNR 数値シミュレーション結果を示す．ここでの SNR に含まれているノイズは，ページデータ間クロストーク，矩形開口での高周波成分喪失である．メモリシステムとして必要な SNR 値は後段の等価器 (equalizer) の性能や誤り訂正処理の能力に依存するが，ここでは所要 SNR を 6 と定める．このとき，ターゲットホログラムの両隣に full format のページデータが記録された場合には $\Delta\theta$ が 0.13° 以上必要となる．一方，両隣に half format のページデータが記録された場合は， $\Delta\theta$ が $0.06 \sim 0.12^\circ$ において SNR が悪化する．特に $\Delta\theta$ が 0.08° 付近での低下は隣接ホログラムからのクロストーク，すなわち Fig. 5.4 における白丸ブ

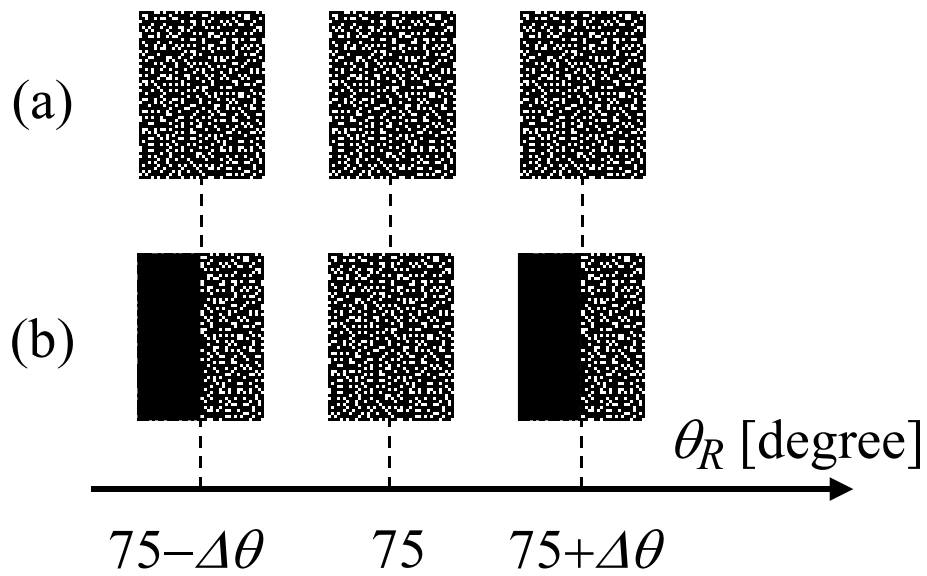


Fig. 5.6 Reference beam angle allocation for three multiplexing holograms including a target at 75° and (a) full format or (b) half format data pages at $75 \pm \Delta\theta$.

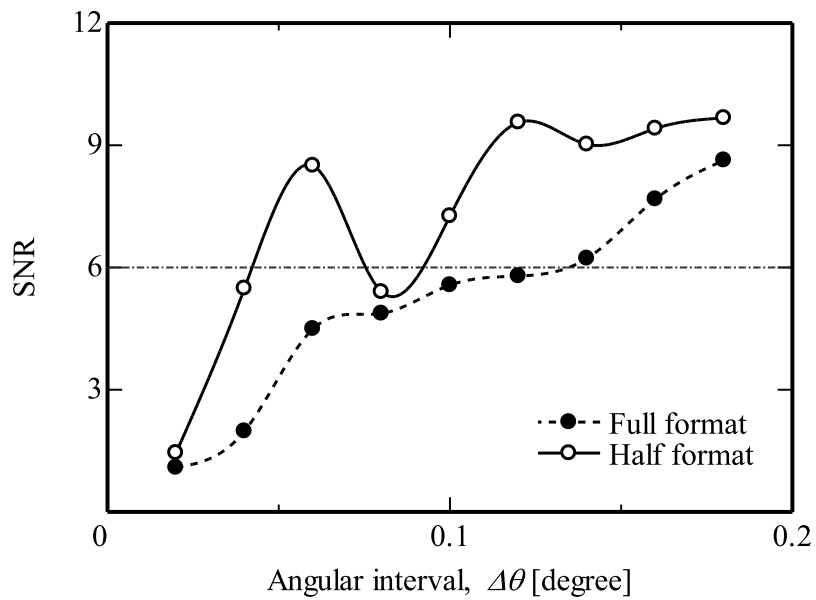


Fig. 5.7 Numerical results of SNR dependency on angular interval in Fig. 5.6(a) and (b).

ロット (half format) が示すサイドローブに起因すると考えられる。以上のシミュレーション結果を元に、full と half format のページデータを交互に多重する記録再生実験を次に行う。

5.4 実験結果

本節では、full と half format の単一ホログラムの角度選択性を実験により測定し、前節での数値見積の妥当性を検証する。さらに、見積もられた角度多重に基づいて提案手法である半ページ挿入法により多重記録実験を行い、再生時の誤り率を検証する。

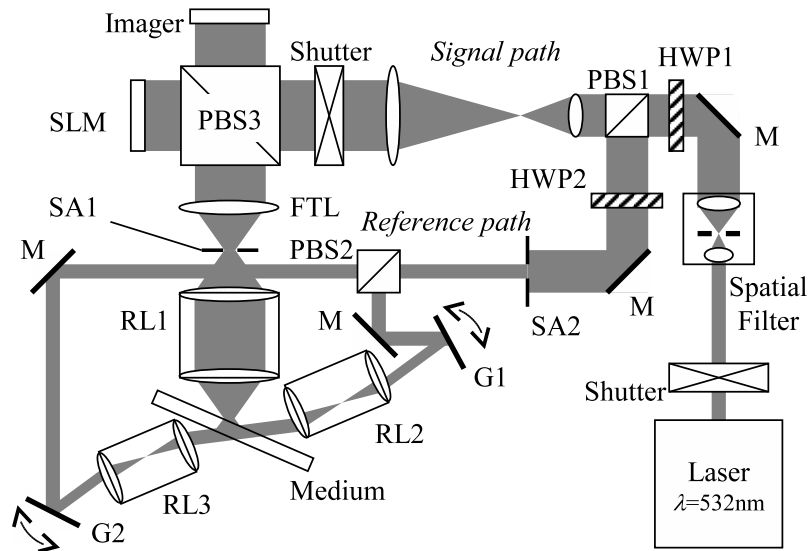
Figure 5.8 に実験光学系を示す。SLM、撮像素子など主要な光学素子は 2.3 節の Fig. 2.7 で示したものと同一である。記録密度向上を図るため、本節の光学系では実効的な焦点距離の短いレンズ系を使用した。

信号光のうち S 偏光成分は FTL を通過したのち、不要な高次回折成分をフーリエ変換面で除去するための矩形開口 (SA : square aperture)¹ を通過し、像転送レンズ (RL : relay lens)¹ により記録媒体へ照射される。RL1 は 1/3 の縮小光学系も兼ねており、FTL と RL1 を併せた実効的な焦点距離は $f = 11.0$ mm である。

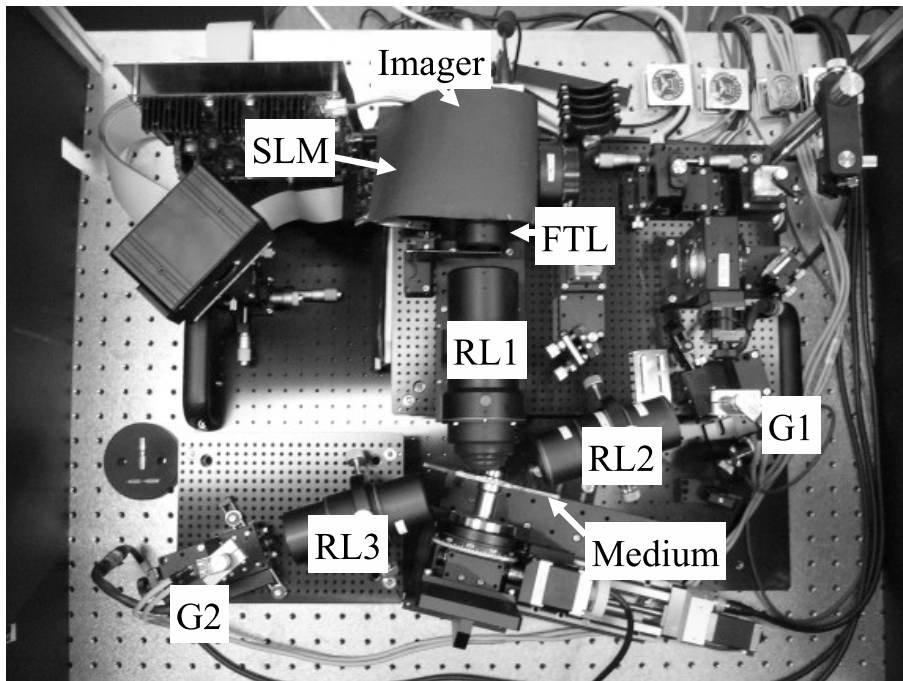
参照光は記録時に FTL 側から S 偏光で媒体へ照射される。信号光と参照光を含む面内方向でガルバノミラー G1 を回転させ、RL2 を通過して角度を変化させながら参照光を媒体へ照射する角度多重を行う。参照光が RL2 の中央を通過するときの信号光軸との角度は 75° である。

記録媒体として、新日鐵化学株式会社のフォトポリマー材料 (厚さ 1 mm) が 2 枚のガラス板で挟まれたものを用いた [10, 11]。媒体は信号光軸に垂直な面から 15° 傾斜させた配置としている。また、ここでの実験では半ページ挿入法の効果をみるため、重合反応に伴う材料の体積収縮をできる限り避けて再生することが望ましい。よってページデータ記録後の post cure は実施しないものとした。

位相共役再生により、ホログラムからの回折光は RL1、SA1、FTL を通過して撮像素子に結像する。再生ページデータ撮影後の画像処理、信号処理についても 2.3 節と同一の系を用いた。



(a)

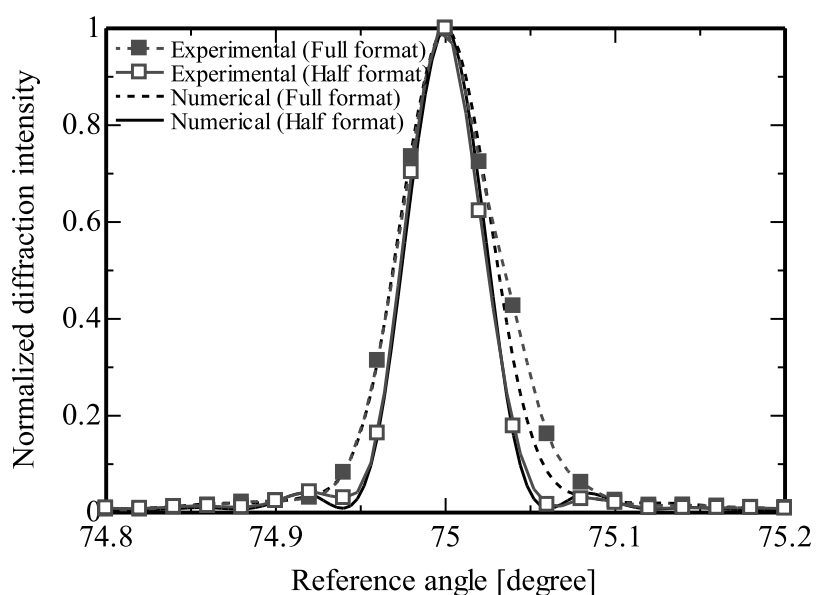


(b)

Fig. 5.8 (a) Schematic diagram and (b) photo of experimental optics. M, HWP, PBS, SLM, FTL, SA, RL, and G stand for mirror, half-wave plate, polarizing beam splitter, spatial light modulator, Fourier transform lens, square aperture, relay lens, and galvanometer mirror, respectively.

5.4.1 角度選択性

まず，full および half format のページデータがそれぞれ単一ホログラムとして記録されている場合の，角度選択曲線の測定結果を Fig. 5.9 に示す．同時にプロットした数値解析結果と比較すると良い一致がみられた．数値計算結果と同様，half format の第一極小点は 0.06° であるが，第一極小点での回折強度が数値結果より大きい．また，full format における曲線の右側 (75° 以上の参照光角度) で数値結果と実験結果で差が生じ，実験結果では曲線の半値全幅が広がっている．post cure は実施していないものの，ページデータ記録時の露光によるわずかな体積収縮によるものであると考えられる．



(a)

Fig. 5.9 Experimental results of angular selectivity curves for full and half format data pages.

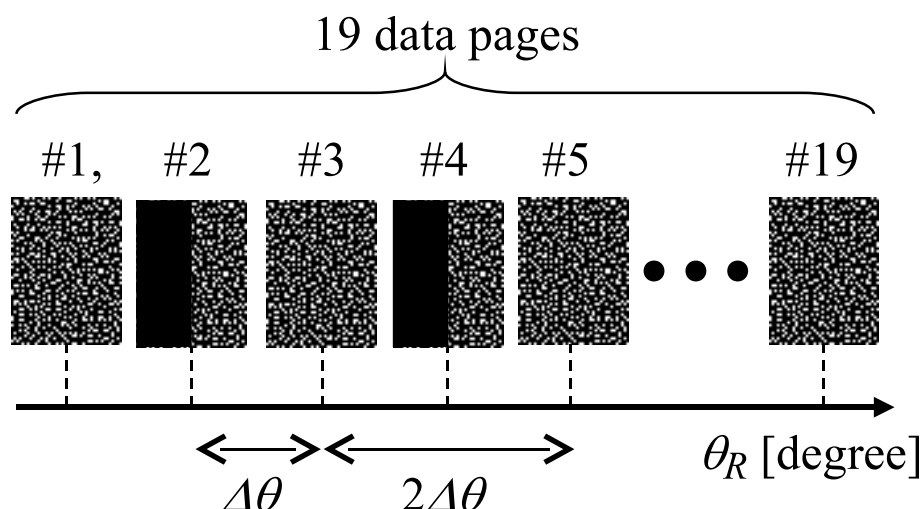


Fig. 5.10 Angle layout for multiplexing full and half format data pages alternately.

5.4.2 角度多重記録結果

次に、5.3節で見積もられた角度間隔に基づき、full と half format 間の角度間隔 $\Delta\theta = 0.06^\circ$ 、および 0.07° とし、2つの full format 間の角度間隔がその2倍、すなわち 0.12° および 0.14° となるよう、full と half format を交互に多重記録した。この場合のページデータの並びを Fig. 5.10 に示す。10枚の full format の間に9枚の half format を挿入し、合計19枚のページデータを多重する。参照光の信号光軸に対する角度は、Fig. 5.10の19枚のページデータのうち中央のものにおいて 75° となるよう設定した。Figure 5.11(a), (b)に、それぞれ $\Delta\theta = 0.07^\circ$ の場合におけるページデータ番号1, 2すなわち full と half format の再生画像を示す。ただし、Fig. 5.11(b)には再生画像の右側のみにデータが存在する。左側半分にもデータらしきものが観測されるが、これは隣接する full format ページデータがクロストークとして重畳しているためであり、half format の左半分にはデータが存在しないためデータ復号時に無視することができる。5.2節で議論したとおり、ページデータ内の場所ごとに角度選択性が異なるため、Fig. 5.11(a), (b)とも右半分で狭い、左半分で広い角度選択性を有することを如実に示している。

Figure 5.12に $\Delta\theta$ が 0.06° , 0.07° の場合の測定した BER を示す。角度間隔 $\Delta\theta$ が 0.06° と 0.07° での19ページの平均 BER はそれぞれ 3.3×10^{-3} と 1.3×10^{-3} であった。Figure 5.7で示唆されたとおり、角度間隔 0.07° のほうがビット誤りは少ない。奇数と偶数のページ番号がそれぞれ full format と half format を示しているが、誤り率の観点からは

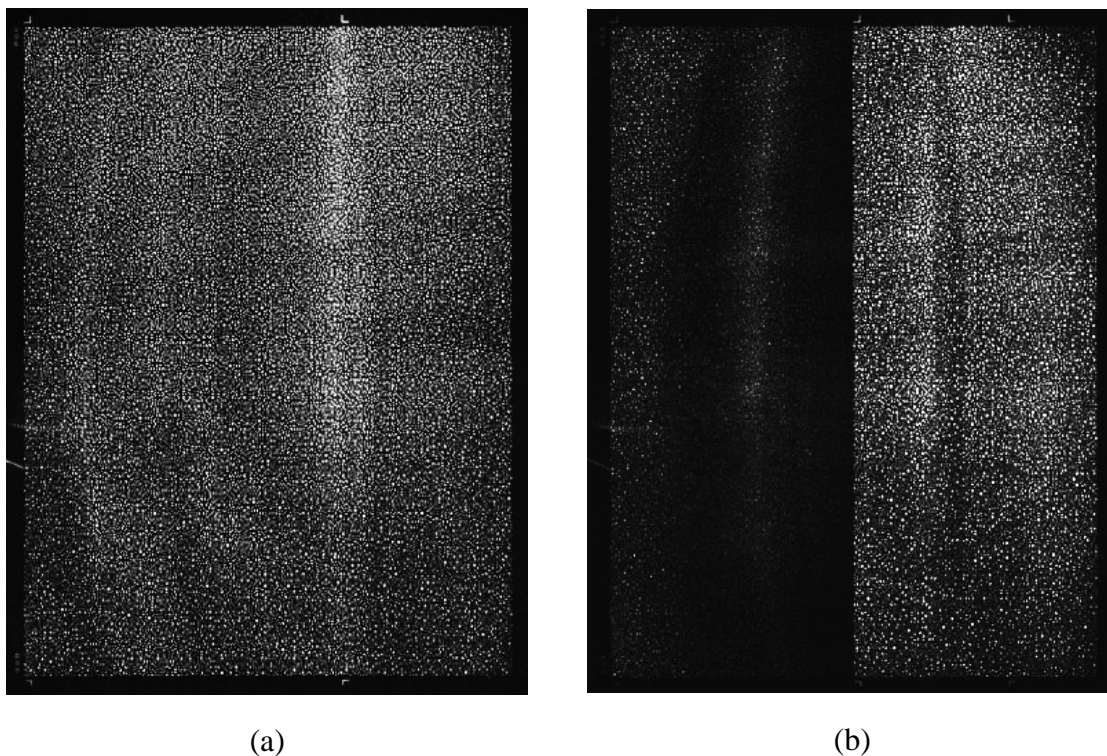


Fig. 5.11 Reproduced data page (a) # 1 and (b) # 2 at $\Delta\theta = 0.07^\circ$.

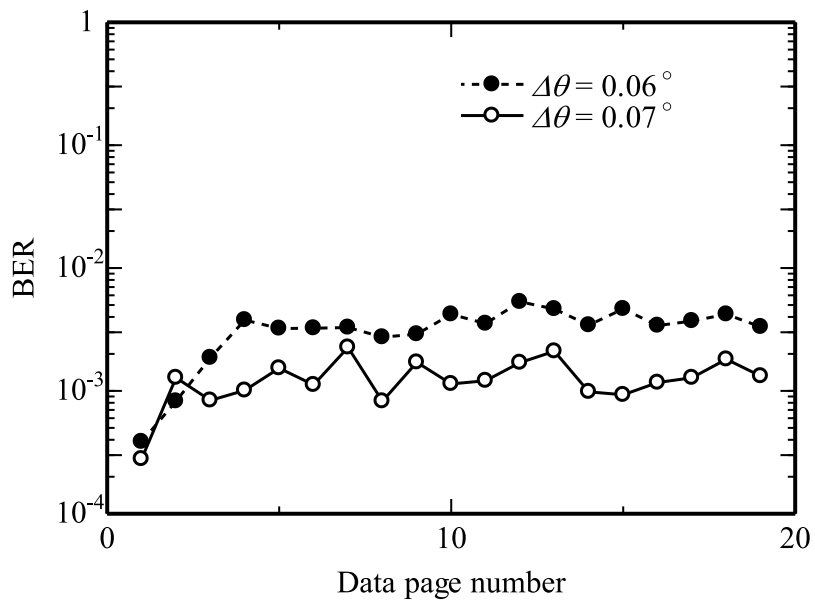


Fig. 5.12 Measured BERs as function of data page number.

フォーマット間で差がみられない。Figure 5.7 の白丸が示すとおり、数値計算の結果では角度間隔 $\Delta\theta$ が 0.06° の場合に full format と half format 間で第一極小点による高い SNR が示されているが、Fig. 5.9 で明らかになったように、記録実験では角度選択曲線における第一極小点の回折強度が数値解析結果よりも大きく、偶数のページ番号すなわち half format における SNR が低下するため、結果として両フォーマット間で BER がほぼ同一の値をとることに繋がったと考えられる。

いずれのページデータにおいても 10^{-3} 台前半の誤り率を得られたので、低密度パリティ検査符号 [12, 13] などの誤り訂正符号を用いれば十分訂正可能な範囲であるといえる。従来は full format のみの多重記録であったが、half format を full format 間に挿入して記録する本方式は最大で従来比 1.5 倍の密度向上への可能性を示した。

5.5 結言

角度多重ホログラフィックメモリにおいて、ページデータ内の場所ごとに角度選択性が異なることに注目し、従来のホログラム角度間隔の間に半分の大きさのページデータを挿入する記録密度向上手法を提案した。すなわち、full format と half format のページデータを用意し、これらを交互に角度多重記録する半ページ挿入法である。特に FTL の焦点距離が短い場合には信号光の収束角度または発散角度が大きく、ページデータ内の場所ごとの角度選択性の差異も大きいことから、本手法の有効性が高い。

まず数値シミュレーションにより両フォーマットの角度選択性を調べ、half format が full format よりも狭い角度間隔で記録可能であることを確認した。次に、一つの full format ホログラムの角度方向両側に full または half format のホログラムが記録された場合における角度間隔対 SNR を数値解析した。ある一定の SNR 値を満たす条件から、所望の角度間隔を見積もった。さらに、計 19 枚の full および half format のページデータを用意し、これらを交互に角度多重記録した。これは half format を full format 間に挿入して記録するので、最大で従来比 1.5 倍の密度向上に相当する。実験結果から、実用上問題ない 10^{-3} 台前半のビット誤り率が得られ、本提案手法の有用性が示された。

参考文献

- [1] M. Miura, O. Matoba, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Image-based numerical evaluation techniques in volume holographic memory systems," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol.24, pp.792-798, 2007.
- [2] M. Miura, O. Matoba, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Three-dimensional shift selectivity in reflection-type holographic disk memory with speckle shift recording," *Applied Optics*, Vol.46, pp.1460-1466, 2007.
- [3] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, "Analysis of a collinear holographic storage system: introduction of pixel spread function," *Optics Letters*, Vol.31, pp.1208-1210, 2006.
- [4] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, N. Shimidzu, T. Ando, K. Masaki, and T. Shimizu, "Angle Scheduling for Divided Datapage Regions in Angular Multiplexing Holographic Memory," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'10)*, Th-M-03, pp.232-233, 2010.
- [5] 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, 仁田功一, 的場修, "データ領域制御による角度多重ホログラムの高密度化," *電子情報通信学会総合大会講演予稿集*, C-7-3, p.31, 2010.
- [6] 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, "角度多重ホログラフィックメモリの密度向上技術," *日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集*, 9pAS2, 2010.
- [7] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *The Bell System Technical Journal*, Vol.48, pp.2909-2947, 1969.
- [8] X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory," *Optics Letters*, Vol.20, pp.1913-1915, 1995.
- [9] A. Pu and D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks," *Applied Optics*, Vol.35, pp.2389-2398, 1996.
- [10] T. Ando, M. Ono, K. Ozaki, and K. Oishi, "Holographic Data Storage Media Employing Phase-Change Reflector," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, pp.3855-3857, 2007.
- [11] T. Ando, K. Masaki, and T. Shimizu, "Holographic Read-Only Memory Fabricated by Deposition of Reflector after Writing Process with Aromatic Photopolymer Recording Layer," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.49, 08KD02, 2010.
- [12] H. Pishro-Nik, N. Rahnavard, J. Ha, F. Fekri, and A. Adibi, "Low-density parity-check codes for volume holographic memory systems," *Applied Optics*, Vol.42, pp.861-870, 2003.
- [13] P. Yoon, B. Chung, H. Kim, J. Park, and G. Park, "Low-Density Parity-Check Code for Holographic Data Storage System with Balanced Modulation Code," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, pp.5981-5988, 2008.

第6章 ノイズ低減と記録密度の算出

6.1 緒言

ホログラフィックメモリからの再生信号は誤り訂正可能な BER であることが求められる。BER は SNR と密接な関係があり、またノイズ量が小さいほど BER を低くできるため、ノイズ低減手法が重要となる。

これまで、媒体取付角誤差や位置誤差、波長変動などの外乱ノイズに対する耐性が Ishii らにより報告された [1]。これは、記録システム自体が有するノイズを DC ノイズとし、外乱ノイズパワーの加法性により、DC ノイズに外乱ノイズがどの程度付加されても許容されるか、というマージンの見積りであった。記録システム全体のパフォーマンス向上に最も有効な低雑音化手法を検討し、その手法を適用した場合の記録密度・容量を算出するには、上記 DC ノイズを分類し、それらノイズの発生要因 [2] ごとにノイズ量を定量的に評価しておく必要がある。そこで本章では、記録システム内のノイズ発生要因ごとにそのノイズ量を分離して測定する手法を提案する。

分離測定されたノイズ要因は、ノイズ量の低減が可能なものと不可避なものに分けることができる。ノイズ量の低減が可能なものについては、具体的にいくつかの低減手法が提案されているが [3-7]、本章では、FTL により信号光の高空間周波数成分が低下する課題の解決手法として、記録時の前置補償を提案する [8,9]。一方、角度多重ホログラフィックメモリに原理的に存在するノイズも存在し、このノイズ量が記録密度の上限を決定づける。このような条件のもとで第4章と第5章で得た知見から、ページデータ間およびページデータ内の角度間隔を最適化した場合について、角度多重ホログラフィックメモリの記録容量・密度を算出する。

6.2 光学系におけるノイズの分離測定

光学系にどのようなノイズが含まれているかを詳しく調べるため，ここではノイズ要因ごとにノイズ量を分離して測定する手法を提案する [10–12]．用いた光学系は2.3節で示したものである．

6.2.1 規格化ノイズパワーの定義

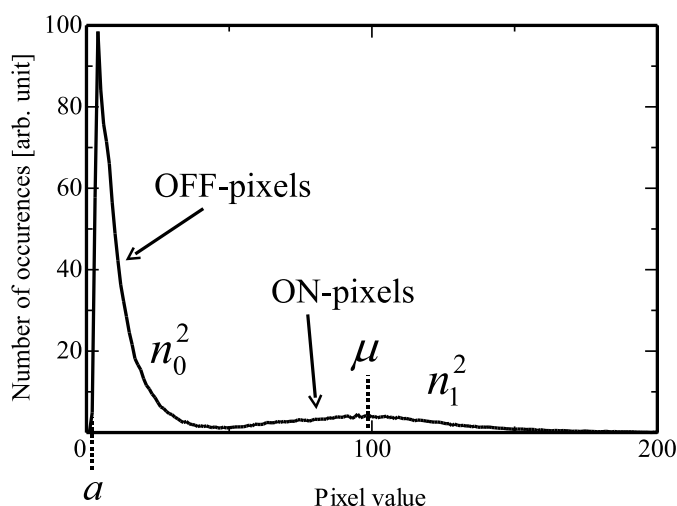


Fig. 6.1 Histogram of reproduced data page modulated with 2:4 code.

再生ページデータから Fig. 6.1 のような画素値に対する頻度をプロットしたヒストグラムを得る．ヒストグラムには二つのピークがある．高い輝度のピークは白信号の，低い輝度のピークは黒信号のノイズ分布を示している．従来 SNR の定義は，これら二つのピークがそれぞれ Gauss 分布であるとして式 (5.1) による統計的な演算が用いられてきた [13]．ここではノイズ量を定量的に評価するため，より詳細にノイズパワーを定義する．過去に Heanue らは，ホログラム再生でのヒストグラムにおけるノイズ分布が Rician 分布である，と報告している [14]．この場合，白信号のノイズ分布は，輝度レベルが大きいことから Gauss 分布に近似することができ，黒信号のノイズ分布は，輝度レベルが低いため，Rayleigh 分布に近似することができる [15]．すなわち，白信

号の Gauss 分布における平均値 μ と分散 σ_1^2 , および黒信号の Rayleigh 分布における母数の最尤推定量 ϕ_0^2 は次式で与えられる [16, 17] .

$$\mu = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x_{1,k} \quad (6.1)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} (\mu - x_{1,k})^2 \quad (6.2)$$

$$\phi_0^2 = \frac{1}{2N_0} \sum_{k=1}^{N_1} (x_{1,k} - a)^2 \quad (6.3)$$

ここで , N_1 , N_0 , $x_{1,k}$, $x_{0,k}$ はそれぞれ白信号と黒信号のノイズ分布に寄与する各画素ブロックの全数と輝度値であり , a は CCD 撮像素子の黒レベル設定に依存したオフセット値で , 2.3 節の光学系では $a = 1$ に設定した . また , 撮像素子の露光時間や光強度のバラツキに左右されないよう μ で規格化し , i を添え字として白信号については

$$n_i^2 \equiv (\sigma_i/\mu)^2 \quad (6.4)$$

により , また黒信号については

$$n_i^2 \equiv 2(\phi_i/\mu)^2 \quad (6.5)$$

で規格化ノイズパワーを定義する [14] .

記録システム内に存在するノイズは , 上記のヒストグラムを元に測定することができ , これは文献 [1] における DC ノイズに相当する . しかしながら , DC ノイズの評価だけでは , 光学システム内のノイズ要因ごとにノイズ量を特定できない . そこで , Table 6.1 のように光学システム内の DC ノイズを要因ごとに分類した . ページデータが多重されていない場合において , ノイズパワーの加法性から , 白信号と黒信号に重畳された規格化ノイズパワーはそれぞれ

$$n_1^2 = n_e^2 + n_L^2 + n_W^2 + n_G^2 \quad (6.6)$$

$$n_1^2 = n_e^2 + n_R^2 \quad (6.7)$$

Table 6.1 Classified noise factors in holographic memory system.

Symbol		Noise factor
σ_e, n_e		CCD dark shot noise, CCD readout noise
σ_L, n_L	σ_F, n_F	Spatial laser noise, laser beam profile, optical interference, CCD fixed pattern noise
	σ_S, n_S	CCD shot noise
σ_W, n_W		Reference beam profile, non-uniformity & non-flatness of medium, wavefront error, optical interference
σ_G, n_G		Aberration in reproduced beam, resampling, optical transfer function (OTF) & inter-symbol interference (ISI) for ON-pixels
ϕ_R, n_R		Resampling, OTF & ISI for OFF-pixels

と表すことができる。各ノイズパワーの測定もヒストグラムを用いて行う。ただし、他のノイズ要因を除外、または既知のノイズパワーの値を代入し、順序だてて測定することが本手法の特徴である。

6.2.2 ノイズパワーの測定

まず、Fig. 6.2(a) のように、レーザーを OFF とし、暗状態で CCD に存在するノイズを測定したところ $\sigma_e^2 = 0.12$ であった。ただしこれは CCD の電氣的ノイズであるため、Gauss 分布として算出した。規格化パワーを求めるため $\mu = 97$ を用いると、 n_e^2 は 1.5×10^{-6} となり、後述の他のノイズパワーに比して十分小さい値であった。

次に、光学系 Fig. 2.7 の面 H の位置に半波長板を置いて PBS3 に S 偏光で入射させ、信号光用ビームを SLM ではなく CCD 撮像素子に導光した (Fig. 6.2(b))。撮影された画像を Fig. 6.3(a) に示す。レーザービームプロファイルが Gauss 分布であるため隅が暗く、また光学部品間での反射による干渉パターンが見られる。この段階では CCD の固定ノイズ、ショットノイズも含まれている。この場合のヒストグラムには黒信号は存在

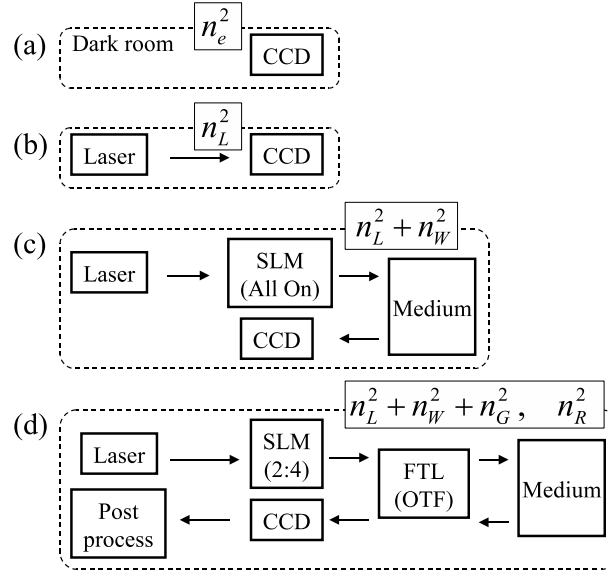


Fig. 6.2 Schematics of noise measurement conditions.

せず，全て白信号とそれに重畳したノイズ分布とみなせる．干渉パターンや固定ノイズのパワー σ_F^2 は白信号の輝度すなわち μ の2乗に比例する．一方，ショットノイズ σ_S^2 については μ に比例することが知られている [18, 19]．そこで，係数 γ_F, γ_S を用いて

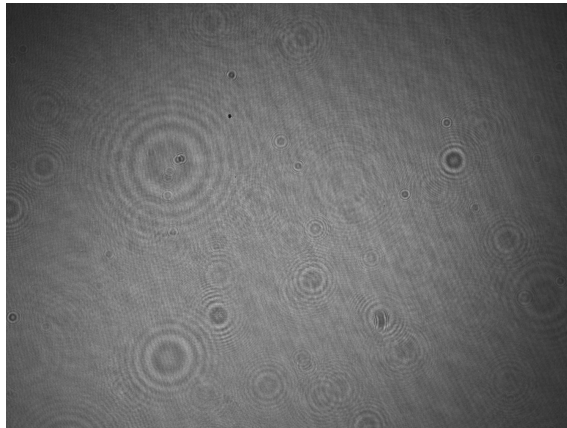
$$\sigma_L^2 = \sigma_F^2 + \sigma_S^2 = \gamma_F \mu^2 + \gamma_S \mu \quad (6.8)$$

または

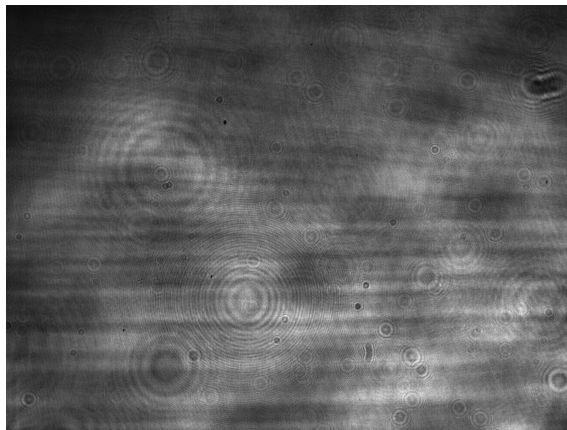
$$n_L^2 = n_F^2 + n_S^2 = \gamma_F + \gamma_S / \mu \quad (6.9)$$

と表す．白信号の強さを変えながら測定し， σ_L^2 を式 (6.1), (6.2) により算出したところ，Fig. 6.4 の白丸で示すプロットが得られた．最小二乗法により $\gamma_F = 0.058$ ， $\gamma_S = 0.072$ が得られ，これは $\mu = 97$ のとき $n_L^2 = 0.059$ となる．このノイズのうち固定パターンに起因するものについては，predistortion technique [3, 20] などの低減化手法が，またビームプロファイルについては，TEM₀₀ モードのレーザーが有するガウシャンビームプロファイルをフラットトップにするアポタイザーなどにより大幅に低減できると考えられる [21]．

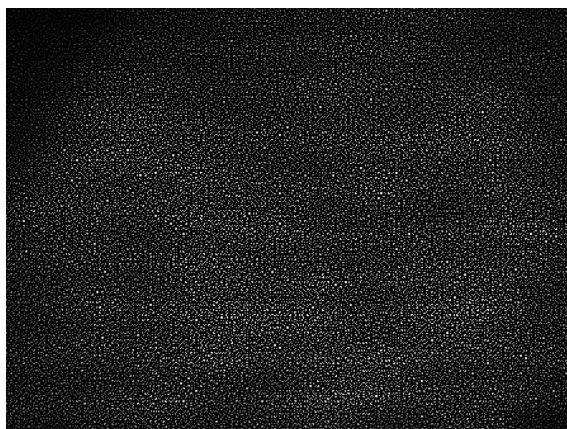
次に，光学系 Fig. 2.7 の面 H に設置した半波長板を除去し，SLM 上の全ての画素を ON とすることで全面白のページデータを表示し，これを一つのホログラムとして媒



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.3 CCD camera images in measurement of (a) n_L^2 , (b) n_W^2 , and (c) n_G^2, n_R^2 .

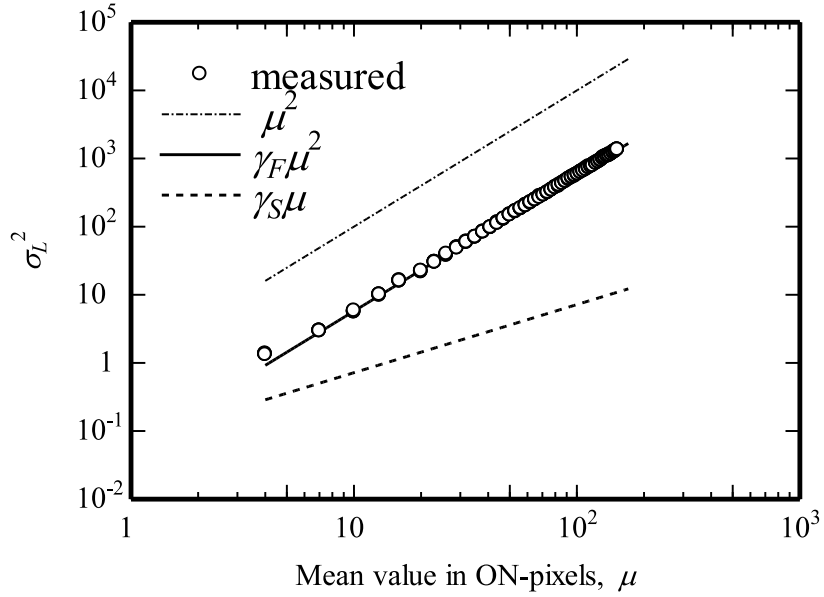


Fig. 6.4 Measured σ_L^2 as function of ON-pixels mean value μ .

体へ記録した (Fig. 6.2(c)) . 媒体として , 東亜合成株式会社製のフォトポリマー材料を 2 枚のガラス板に挟んだものを準備した [22] . このとき , 媒体角度 θ_m は 0° とした . 媒体の体積収縮の影響を避けるため , 記録直後に再生した . 得られた再生画像のヒストグラムもまた白信号とそれに重畳されたノイズすなわち n_L^2 と n_W^2 が含まれており , 式 (6.1) , (6.2) より $n_L^2 + n_W^2 = 0.12$ が算出され , n_L^2 が既知であるため $n_W^2 = 0.061$ が導かれる . Figure 6.3(b) に再生画像を示す . 試作した媒体は材料の充填ムラにより屈折率分布が不均一であったため , まだら模様が顕著である . これは媒体内部での再生時の参照光に相対的な波面収差をもたらし , 位相共役条件の不整合を部分的に起こしたためと考えられ , 媒体作製の精度向上や適応光学を用いた補償 [4, 23] などにより改善が期待できる .

次に , 別の媒体に 2:4 符号で構成されたページデータを 1 枚だけ記録し , 媒体の体積収縮の影響を避けるため , 記録直後に再生した (Fig. 6.2(d)) . 再生画像を Fig. 6.3(c) に示す . 再生ページデータには既知ノイズ σ_L^2 と σ_W^2 に加え画素間干渉 (ISI : inter-symbol interference) やリサンプリングの影響が含まれている . また Fig. 6.3(b) の再生画像にみられるように , 参照光に相対的な波面収差が存在する場合には位相共役を用いたと

Table 6.2 Measured noise powers normalized by ON-pixel's average.

Noise factor	Measured noise power normalized by $\mu = 97$
CCD dark shot noise, CCD readout noise	$n_e^2 = 1.5 \times 10^{-6}$
Spatial laser noise, laser beam profile, optical interference, CCD fixed pattern noise CCD shot noise	$n_L^2 = 0.059$
Reference beam profile, non-uniformity & non-flatness of medium, wavefront error, optical interference	$n_W^2 = 0.061$
Aberration in reproduced beam, resampling, optical transfer function (OTF) & inter-symbol interference (ISI) for ON-pixels	$n_G^2 = 0.092$
Resampling, OTF & ISI for OFF-pixels	$n_R^2 = 0.0092$

しても再生光自体にも収差が含まれるため、撮像素子上の輝点に広がりを生じ、これがノイズとなり重畳される。このとき Fig. 6.1 に示すヒストグラムが得られ、白信号のノイズ分布から式 (6.1), (6.2) を用いて、 $n_L^2 + n_W^2 + n_G^2 = 0.21$ 、すなわち $n_G^2 = 0.092$ を得た。また、黒信号のノイズ分布は式 (6.3) より、 $n_R^2 = 0.0092$ を得、白信号のノイズが黒信号のそれより顕著であった。

以上の測定結果を Table 6.2 にまとめた。 n_L^2 と n_W^2 については光学系の工夫と記録媒体作成精度の向上により大部分を低減できると考えられ、その場合は n_G^2 のうち参照光の相対的な波面収差に起因する再生光収差も低減されることとなる。一方、 n_G^2 のうち残りの成分は OTF(optical transfer function) に由来するが、OTF を決定付ける主要要素は、レンズによる高空間周波数の劣化と、矩形開口による帯域制限である。矩形開口は開口多重すなわち位置シフト選択性を与えるために必要であることから、 n_G^2 の完全除去は困難である。

そこで次節以降では、FTL による高空間周波数の劣化を抑制する手法を提案し、さらに矩形開口による帯域制限の BER への影響を調べる。

6.3 レンズによる高空間周波数成分劣化とその補償

ページデータにより空間的に変調された信号光はFTLを通じて媒体へ照射される。このとき信号光軸上のフーリエ変換面に配置された開口により、高次回折光成分が除去される。また、ページデータを表示・撮影するSLMや撮像素子は画素構造を有するため空間的に離散化されたサンプリングを行うことになる。これら光学系の特性により、信号光および再生光の高空間周波数成分の振幅は低下する。このため、ホログラムから再生されたページデータの輝度均一性と信号品質が低下する課題があった。

輝度均一性が低くSNRも低い系では、2:4符号や9:16符号などの変調符号を使用しなければBERの悪化をまねくが、これらの符号は符号化効率の観点でNRZ符号より不利である。1ページデータあたりのビット数を向上し記録密度 D を上げるために、NRZ符号あるいはこれに近い効率の符号を用いることが望ましい。NRZ符号を用いるには連続符号長(run-length)に依らず輝度均一性を確保する必要がある。

ところで、高空間周波数成分の振幅低下を解決するために、再生ページデータにFIR(finete impulse response)フィルタを作用させる手法が提案されている[24]。この場合、再生時に重畳されたノイズ成分も増幅される可能性がある。一方記録時の補償手段として、元ページデータの記録直後に高空間周波数成分のみをに重ね書きする手法が提案されている[25]。しかしこの方法は二度の露光が必要な方法であり、転送速度の低下を招く課題があった。そこで本節では、測定された光学系の空間周波数応答に基づく、記録時の高空間周波数成分の事前増強技術を提案する。6.3.1項では実験装置における空間周波数応答特性の測定結果を示す。高空間周波数成分の振幅低下を補償するために、空間周波数応答特性の逆関数に基づき、事前増強関数を6.3.2項で定義する。この事前増強関数を用いる場合と用いない場合について記録再生結果をBERで評価し、本提案の有効性を示す。また、増強度に対するBERの依存性についても示す。

6.3.1 周波数応答特性

高空間周波数の事前増強に際し、どのように増強すべきかを定義する必要がある。このため、実験光学系がどのような空間周波数応答を有しているかを調べる。実験光学系には2.3節で述べたものを用いる。測定する空間周波数応答は、FTLの特性、SLMと撮像素子の空間サンプリング、矩形開口といった光学系全体の応答を含んでいる。特

に，矩形開口は信号光の高空間周波数成分を除去する低域通過フィルタの役割を果たす．実験装置での矩形開口の一辺の大きさ l_{SA} は 1 mm としており，式 (2.25) における輝点ブロックピッチ $d = 31.2 \mu\text{m}$ ，FTL の焦点距離 $f = 28.2 \text{ mm}$ ，波長 $\lambda = 532 \text{ nm}$ を用いて，遮断空間周波数 f_0 は

$$f_0 : \frac{1}{2d} = l_{SA} : \frac{f\lambda}{d} \quad (6.10)$$

を満たすから，

$$f_0 = \frac{l_{SA}}{2f\lambda} = 33.4 \text{ cycle/mm} \quad (6.11)$$

と表せる．

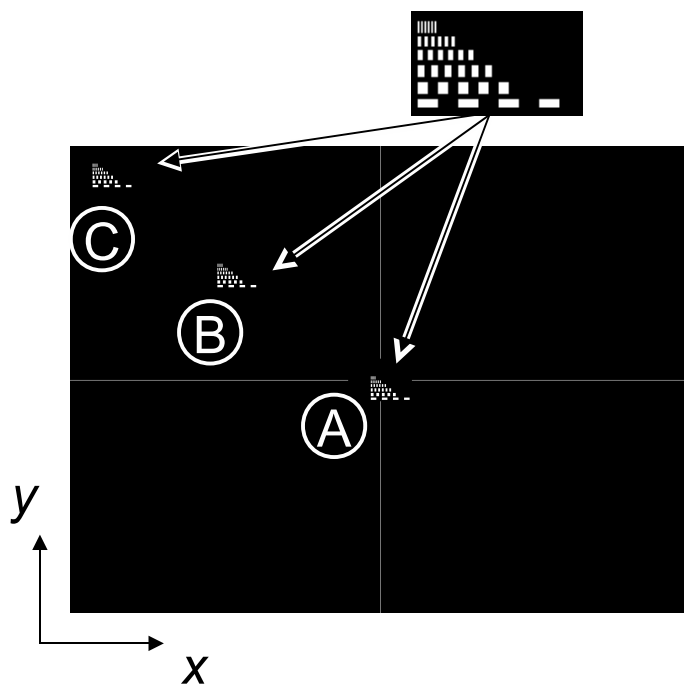


Fig. 6.5 Rectangular wave test chart and position-A to -C.

ここでは近似関数を用いてそれら光学系全体の応答特性を表現する．SLM は画素構造を有するため，空間周波数と直接関係する正弦波伝達特性を直接求めることは困難を伴う．そこで，まず矩形波伝達特性を測定し，その結果より正弦波伝達特性を導出する．Figure 6.5 に示す矩形波テストチャートを SLM に表示して媒体へ記録後，再生した．矩形波テストチャートの位置 A(光軸上)，B，および C(最外周) には周期 2～

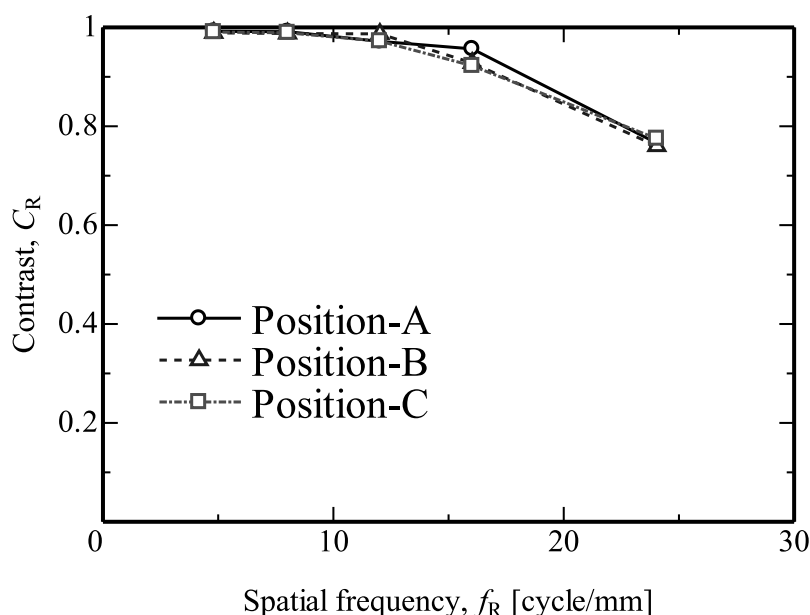


Fig. 6.6 Measured contrasts as function of spatial frequency of rectangular wave.

20 pixel すなわち空間周波数 0.05 ~ 0.5 cycle/pixel の矩形波が描かれている．矩形波テストチャートの四隅には Fig. 2.10 と同様の位置検出用マーカー画像を付加した．マーカー画像を元に再生された矩形波テストチャートを切り出し，線形補完により画像整形したのち，位置 A から C までの領域における各矩形波のコントラストを測定した．このとき矩形波のコントラスト C_R は次式により求めた．

$$C_R = \frac{I_{ON} - I_{OFF}}{I_{ON} + I_{OFF}} \quad (6.12)$$

ここで， I_{ON} と I_{OFF} はそれぞれ矩形波の ON 状態と OFF 状態の輝度測定値を示す．

Figure 6.6 は位置 A から C までの領域における各矩形波の空間周波数に対するコントラスト C_R をプロットしたものである．光学システムによっては画像の場所ごとに周波数応答の異なる場合もあるが，試作した記録再生実験系では微小な差であることが確認できた．よって，事前増強関数を画像内位置の関数として定義する必要はないといえる．なお，矩形波周波数 48.1 cycle/mm すなわち SLM 上で最も短い周期 2 pixel の成分は矩形開口により遮断されているため，直接測定することはできない．

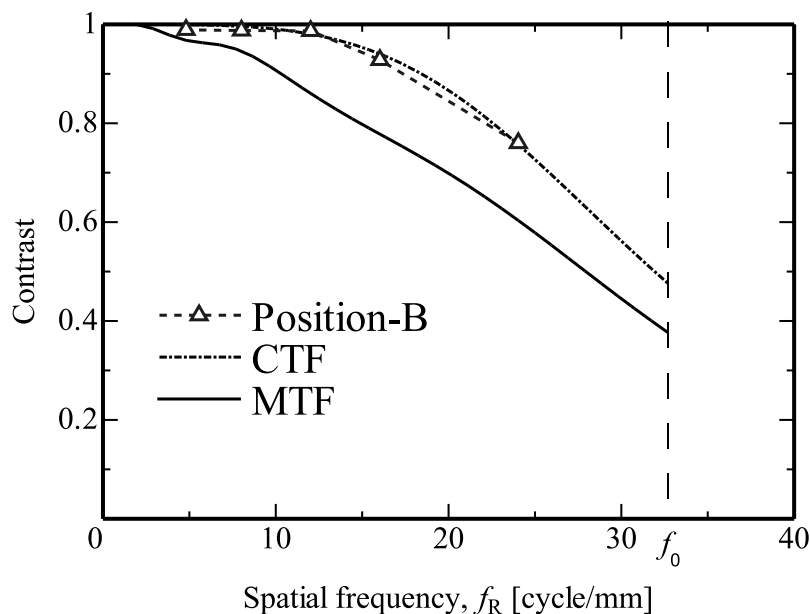


Fig. 6.7 CTF and MTF.

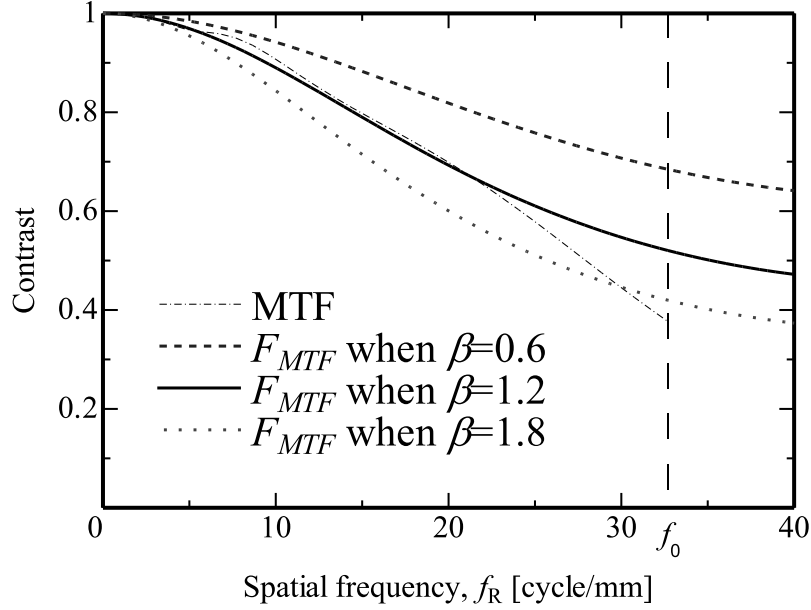
次に，測定したコントラストのプロットから，近似関数を用いて contrast transfer function (CTF) を表現し，CTF から modulation transfer function (MTF) を算出する．まず，CTF を表現する近似関数として，測定したコントラストのプロット (Fig. 6.6) に沿い，また空間周波数の増加に伴い単調減少する，次の近似関数を用いた．

$$CTF(f_R) \equiv (1 + \alpha \cdot f_R^4)^{-1} \quad (6.13)$$

ここで， f_R は Fig. 3.18 における p 方向の空間周波数 μ または q 方向の空間周波数 ν であり， α は係数である．CTF から MTF への変換には次の Coltman's formula を使用した [26] ．

$$MTF(f_R) = \frac{\pi}{4} \left\{ CTF(f_R) + \frac{CTF(3f_R)}{3} - \frac{CTF(5f_R)}{5} + \frac{CTF(7f_R)}{7} + \dots \right\} \quad (6.14)$$

Coltman's formula は無限級数の形で表されるが，今回は第4項までを採用した．式 (6.13) の係数 $\alpha = 9.6 \times 10^{-7}$ としたときの $CTF(f_R)$ および式 (6.14) から導かれる $MTF(f_R)$ を Fig. 6.7 に示す．参考のため位置 B の矩形波周波数応答もプロットした．

Fig. 6.8 Plots for F_{MTF} when $\alpha=0.6, 1.2,$ and 1.8 .

6.3.2 高空間周波成分の増強

ここでは、前項で調べた MTF に基づく事前増強関数を定義し、実際のページデータに適用して記録再生することで、本手法の効果を BER により評価する。

MTF に基づく空間周波数の事前増強関数としては MTF の逆関数が望ましいと考えられる。しかし、 f_0 以上の空間周波数成分は矩形開口により遮断されており、遮断されている周波数領域については逆関数を定義することが困難である。そこで、式 (6.14) から求めた MTF 曲線に低周波域での特性に近い次の関数で MTF を近似する。

$$F_{MTF}(f_R) \equiv \left\{ 1 + \beta \sin^2 \left(\frac{\pi f_R}{2f_0} \right) \right\}^{-1} \quad (6.15)$$

ただし、 f_0 は SLM が表現可能な最高空間周波数 48.1 cycle/mm、 β は係数であり、 β の値を変えることで高空間周波数の増強度合いを制御できる。例として $\beta = 0.8, 1.2,$ および 1.6 のときの $F_{MTF}(f_R)$ を Fig. 6.8 に示す。この関数 $F_{MTF}(f_R)$ は低い空間周波数では MTF と近い値をとるが、空間周波数が高くなるに従い、MTF との差が大きくなる

よう定めた．実際の適用にあたり，二次元方向の空間周波数 (μ, ν) に対応する必要があるから，MTF に基づく事前増強関数 $G_{MTF}(\mu, \nu)$ を次のように定義した．

$$G_{MTF}(\mu, \nu) \equiv F_{MTF}^{-1}(\mu) \cdot F_{MTF}^{-1}(\nu) = \left\{ 1 + \beta \sin^2 \left(\frac{\pi\mu}{2f_0} \right) \right\} \cdot \left\{ 1 + \beta \sin^2 \left(\frac{\pi\nu}{2f_0} \right) \right\} \quad (6.16)$$

次に，記録時に事前増強を行うプロセスについて述べると以下のようなになる．

1. 入力されたビット列からページデータとなる二次元配列 $h(p, q)$ を生成する．ここでは符号化効率の観点から，9:16 符号や 2:4 符号などの変調符号ではなく NRZ 符号を用いた．
2. FFT 実行を考慮し，二次元配列の一边の画素数が 2 の n 乗 (n は整数) となるよう，黒領域を付加 (zero-padding) し，新たな二次元配列 $a(p, q)$ を得る．今回の実験条件では，一边の画素数が 2048 となるようにした．
3. 二次元配列 $a(p, q)$ の FFT 演算により，空間周波数成分の配列 $H(\mu, \nu)$ に変換する．
4. 各空間周波数 (μ, ν) ごとの成分に対し， $G_{MTF}(\mu, \nu)$ を乗算し，空間周波数成分の配列 $B(\mu, \nu)$ を得る．
5. $B(\mu, \nu)$ の逆 FFT 演算により，実空間 $b(p, q)$ を得た後，黒領域を削除して $c(p, q)$ を得る．
6. SLM のビット深度に合わせるため， $c(p, q)$ の各画素値を正規化し，最終的な SLM へ表示するためのページデータ $o(p, q)$ を得る．今回は 256 階調なので，最大画素値を 255 に，最小画素値を 0 に対応させて正規化する．

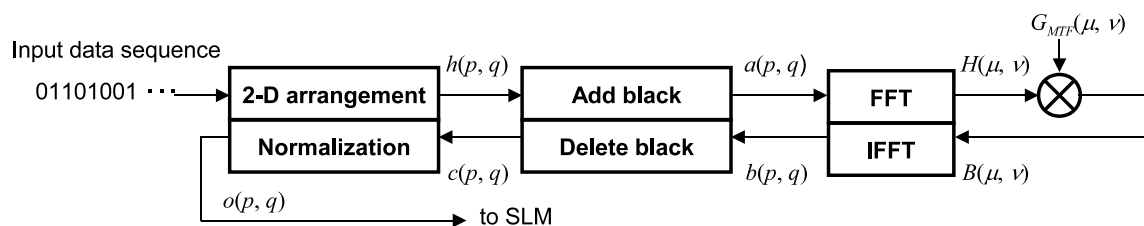


Fig. 6.9 Procedure of pre-enhancement before displaying on the SLM.

この流れを図示すれば、Fig. 6.9 のようになる。この手順により、係数 β を 0.0 から 3.0 まで変化させたときのページデータを 16 枚生成し、これらを記録媒体へ角度多重記録後、再生した。記録媒体としては InPhase Technologies 社のフォトポリマー材料を用いた。入力したデータ列はランダムなビット列とした。角度間隔はクロストークの影響が十分低くなるよう 1.0° とした。

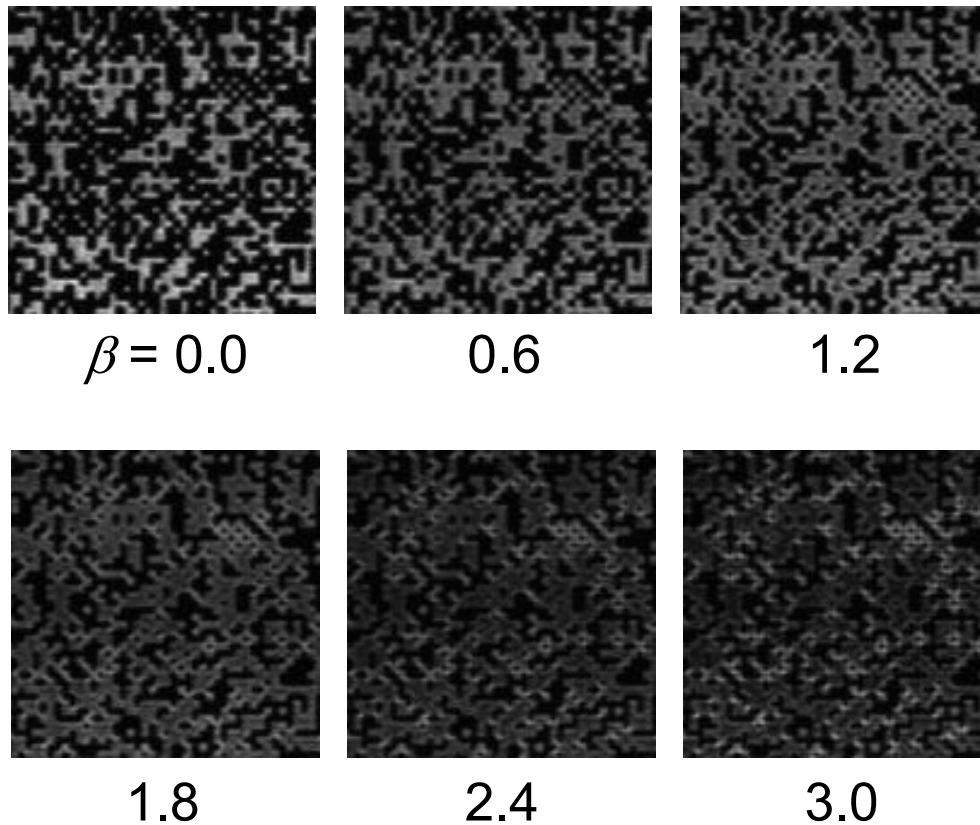


Fig. 6.10 Portions of reproduced data pages at various values of coefficient β .

Figure 6.10 に β が 0.0, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 で $G_{MTF}(\mu, \nu)$ を作用させた場合の、再生ページデータの一部を示す。 β が 0.0 のときすなわち事前増強技術を用いない場合は再生像の先鋭度が低下し、run-length の短い画素列の輝度が長い画素列の輝度よりも低いことがわかる。一方、 β が 1.8 以上のときは高域増強が過度になり、輝度均一性が損なわれた。 β が 0.6 ~ 1.2 で run-length によらず均一な輝度が得られた。

Figure 6.11 は $G_{MTF}(\mu, \nu)$ を用いた場合の係数 β に対する BER の測定結果である。Figure 6.8 では、増強度合いを表す係数 β が 1.2 の場合に MTF にフィットしているが、実際には係数 $\beta = 0.6$ で最良な BER を得た。この差異は、一次元の空間周波数応答と

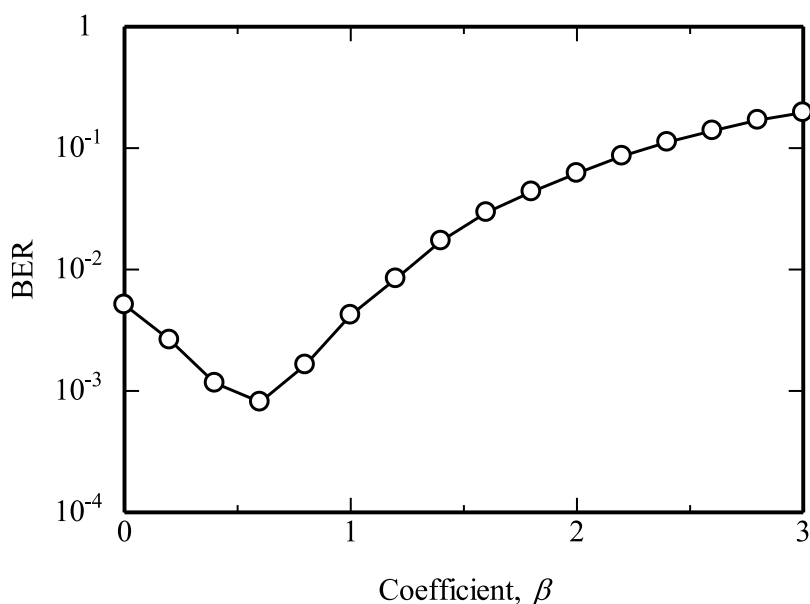


Fig. 6.11 Experimental result of BER dependency on coefficient β .

二次元の空間周波数応答の差と考えられ、再生像から特に斜め方向で過度に増強されていることがわかる。斜め方向の画素のつながりは、黒信号に大きな漏れ光をおよぼすため、ビット誤りを生じやすくなったと考えられる。なお、係数 $\beta = 0.6$ として高空間周波数を事前増強した場合の BER は 8.1×10^{-4} であり、用いない場合 ($\beta = 0.0$) の BER = 5.1×10^{-3} に比べビット誤りを 80% 以上削減することができた。

6.4 矩形開口による帯域制限

前節では OTF のうちレンズによる高空間周波数成分の低下を抑制する手法について述べた。もう一つの OTF の主要な要素である、矩形開口による帯域制限について考察する。

Figure 2.5 でも説明したとおり、矩形開口の大きさが小さいほど位置シフト選択性を高く、すなわち隣接ブック間隔を狭くすることができるため、記録密度向上に有利となる。しかしながら、これはより多くの高空間周波数成分を除去することを意味し、信号品質劣化につながる。ただし再生ページデータの信号品質劣化が、後処理である

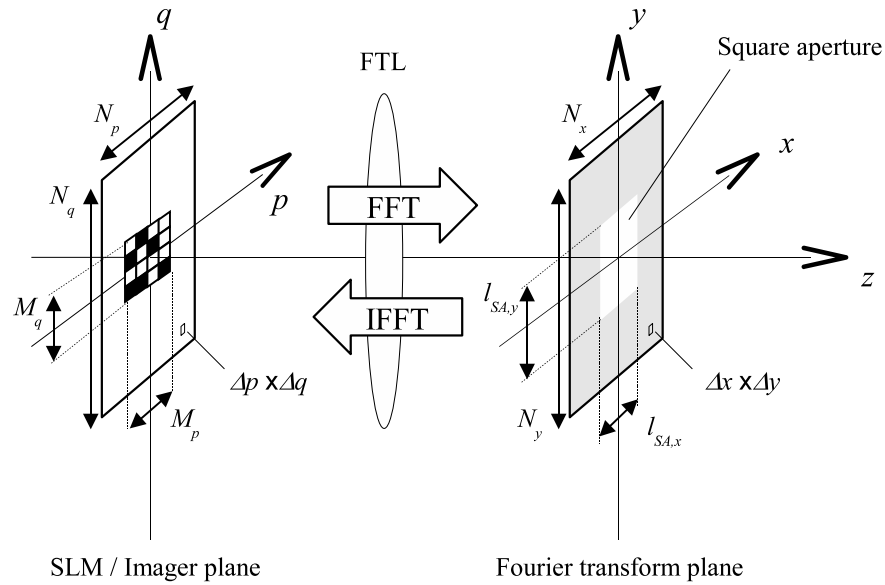


Fig. 6.12 Schematics diagram for numerical simulation of square aperture size dependency.

誤り訂正の許容範囲内であればよい．そこで本節では矩形開口の大きさと信号品質および BER の関係を調べる．

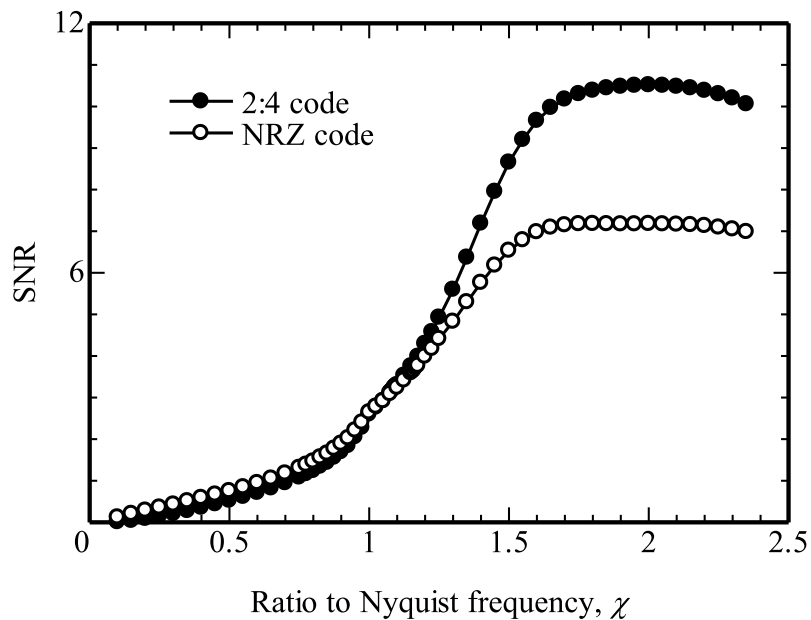
矩形開口の x 軸, y 軸方向の大きさ $l_{SA,x}$, $l_{SA,y}$ は, 一般的に輝点ブロックのピッチで決まるナイキスト周波数に対して 1.0~2.0 倍に定められ, その倍率を χ として式 (2.25) と同様の関係から,

$$l_{SA,x} = \frac{\chi f \lambda}{N_o \Delta x}, \quad l_{SA,y} = \frac{\chi f \lambda}{N_o \Delta y} \quad (6.17)$$

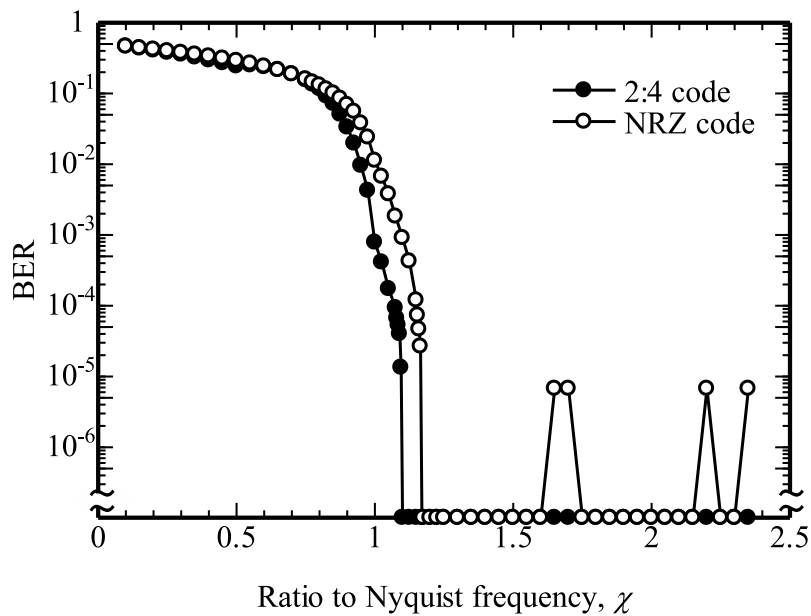
と表される．第 4 章, 第 5 章, 6.2 節および 6.3 節では全て χ をおよそ 2.0 としていた．

Figure 6.12 にページデータと矩形開口の関係を図示する．光学的フーリエ変換面に設置された矩形開口は数値計算上, ページデータを FFT 演算して空間周波数に展開したのに対し式 (6.17) の大きさで帯域通過フィルタを作用させる．この数値計算に用いたパラメータを Table 6.3 に示す．

Figure 6.13(a) は変調符号を 2:4 符号または NRZ 符号とした場合の, 数値計算により得られた χ に対する SNR である．ここで SNR は式 (5.1) により算出した．その際, 1 つの輝点すなわち $N_o \times N_o$ 画素の平均値を輝点の代表値としてヒストグラムを生成した．



(a)



(b)

Fig. 6.13 Numerical results of (a)SNR and (b) BER dependencies on χ .

Table 6.3 Parameters for numerical simulation of square aperture size dependency.

Oversampling rate, N_o	8
Number of cells in SLM / imager plane, $N_p \times N_q$	4096 × 4096
Number of cells for data page region, $M_p \times M_q$	2688 × 3584
Cell size in SLM / imager plane, $\Delta p \times \Delta q$	3.9 × 3.9 μm
Number of cells in Fourier plane / medium surface, $N_x \times N_y$	4096 × 4096
Cell size in Fourier plane / medium surface, $\Delta x \times \Delta y$	0.3663 × 0.3663 μm
Aperture size ratio to Nyquist spatial frequency, χ	0.1 to 2.35

この数値計算で考慮に入れているものは、6.2 節で考察したノイズのうち σ_G^2 のみであり、かつレンズの OTF は含まない。Figure 6.13(a) より、 $\chi = 2.0$ では 2:4 符号と NRZ 符号とで高い SNR を示し、帯域制限によるノイズ量が小さくなることがわかる。 $\chi = 2.0$ の場合には特に 2:4 符号での SNR が高い。本研究で χ をおよそ 2.0 とした実験結果は、帯域制限による信号劣化が小さい状態で評価したものであったといえる。 χ が 1.7 以下になると急激に SNR の低下が顕著になる。どの帯域まで通過させても問題ないかは、どの程度の SNR まで許容されるかという点に大きく依存する。符号化方式の比較では χ が 1.1 以上において 2:4 符号が NRZ 符号よりも SNR の点で有利である。ただし χ を小さくするに従い、その差は小さくなる。

Figure 6.13(b) に、 χ に対する BER 依存性を示す。NRZ 符号で χ が大きい場合に $\text{BER} = 6.6 \times 10^{-6}$ の誤り率を示す場合があるが、これはページデータ中たかだか 1 ビットの誤りを意味し、計算誤差の影響と考えられる。どちらの符号化方式を用いても χ が 1.2 以上であればビット誤りをほとんど生じない。すなわち、矩形開口の帯域制限以外にノイズ源がない場合には、 $\chi = 1.2$ に設定しても問題ないことを表す。許容される最大誤り率を 1.0×10^{-3} としたとき、2:4 符号時で $\chi = 1.0$ 、NRZ 符号時で $\chi = 1.1$ に設定することができる。

6.5 角度多重ホログラフィックメモリの記録密度算出

第4章では，ホログラム（ページデータ）ごとに隣接ホログラムとの角度間隔を制御するため，角度スケジュールを用いた．その際，角度スケジュールは角度可変範囲の両端と中央の3点における角度選択曲線を基準とし，近似関数を用いて定義した．第5章では，角度間隔が信号光内の素平面波入射角度に依存することに注目した半ページ挿入法を提案し，記録密度を最大1.5倍に高める見通しを得た．第4章，第5章とも，あるクロストークノイズ量のもとで多重数を向上させるための手法であったと言える．また，本章の前節までではシステム内のノイズ量をその要因ごとに分離して測定するとともに，高周波数成分の事前増強手法を提案した．このほか様々に提案されている低ノイズ化手法と併せ，多くのノイズ要因については改善が見込まれるが，矩形開口による高周波数成分の喪失は原理的に避けられない．本節ではこれらの結果をもとに，角度多重ホログラフィックメモリの記録密度を算出する．

6.5.1 不可避ノイズ下でのSNRの見積り

第5章のFig. 5.7では所要SNRを6と定めることにより，半ページ挿入法に必要な角度間隔 $\Delta\theta$ を数値計算により見積もった．このとき数値計算が考慮していたノイズ成分は，隣接ホログラムからのクロストークと， $\chi = 2$ とした場合の矩形開口での高周波数成分喪失であった．この場合について，実験により 10^{-3} 台前半のBERを確認した．

今，式(5.1)よりSNRの2乗の逆数が規格化ノイズパワーに近似できることを考慮し，クロストークおよび高周波数成分喪失による規格化ノイズパワーをそれぞれ n_X^2 ， n_A^2 と定めると，Fig. 5.7での所要SNRを6とした条件は，

$$n_X^2 + n_A^2 \approx \text{SNR}^{-2} = 6^{-2} \quad (6.18)$$

と記述できる．さらに，高空間周波数成分の喪失のみを考慮したFig. 6.13(a)から，2:4符号時の $\chi = 2$ でのSNR=10.5を用いて $n_A^2 = 10.5^{-2}$ と近似される．よって，クロストークの規格化ノイズパワー $n_X^2 \approx 6^{-2} - 10.5^{-2} = 0.0187$ が得られる．

さて前節の結論に基づき，高記録密度実現のため $\chi = 1.2$ を採用した場合を考えると，高空間周波数成分の喪失によるノイズ n_A^2 のみを考慮したFig. 6.13(a)の結果から2:4符号の場合SNR=4.29，NRZ符号の場合SNR=3.99であり，それぞれ $n_A^2 \approx 4.29^{-2} = 0.0543$ ，

$n_A^2 \approx 3.99^{-2} = 0.0628$ に対応する．従って，原理的に不可避のノイズ（クロストーク，高周波数成分喪失）は， $\chi = 1.2$ とした場合 2:4 符号で $n_X^2 + n_A^2 = 0.073$ ，NRZ 符号で $n_X^2 + n_A^2 = 0.0815$ となり，SNR に換算すれば 2:4 符号で SNR=3.7，NRZ 符号で SNR=3.5 となる．

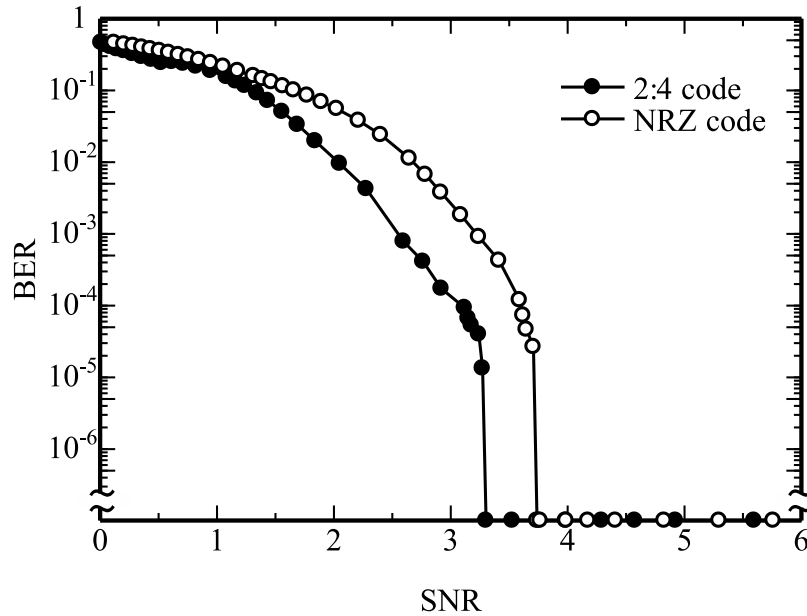


Fig. 6.14 Numerical results of the relation between SNR and BER.

Figure 6.14 は Fig. 6.13 の結果を SNR 対 BER の関係として図示したものである．2:4 符号で SNR=3.7，NRZ 符号で SNR=3.5 の場合，BER はそれぞれ $0, 3 \times 10^{-4}$ であり，無誤りもしくは誤り訂正可能な範囲である．すなわち， $\chi = 1.2$ としたときの高空間周波数成分の喪失に伴うノイズ n_A^2 と，第 4 章および第 5 章で示した適切な角度間隔下でのクロストークノイズが存在する場合の誤り率は十分低いと考えてよい．

6.5.2 記録密度向上手法を用いた場合の記録密度

次に, Table 6.4 に挙げる条件での記録密度を算出する.

Table 6.4 Parameters for estimating the recording density.

Wavelength in free space λ	532 nm
Medium tilt angle, θ_m	15.0°
Thickness of recording layer in medium, T	1.0 mm
Refractive index of recording layer in medium, n_0	1.5
Focal length of FTL, f	11.0 mm
Number of pixels, $M_p \times M_q$	336 × 448
Pixel pitch, $\Delta p \times \Delta q$	31.2 × 31.2 μm
Incident angle range of reference beam, θ_R	60.0 to 90.0°

参照光入射角度 θ_R が 60, 75, 90° 付近において, 半ページ挿入法に必要な角度間隔と SNR の関係を 5.3.2 項と同様に数値シミュレーションで求めた. 結果を Fig. 6.15 に示す. また, 所要 SNR=6 とした場合の最適角度間隔 $\Delta\theta$ を Table 6.5 に示す. ここで SNR=6 とは, 6.5.1 項で論じたとおり $n_A^2 = 10.5^{-2}$, $n_X^2 = 0.0187$ に相当する. なお半ページ挿入法を実現するため, Table 6.5 では full format のための角度間隔を half format の角度間隔の 2 倍とした.

次に第4章と同様, 角度可変範囲の両端と中央, すなわち参照光入射角度 θ_R が 60, 75, 90° の 3 点での角度間隔を用いて, 全てのホログラムに対する角度間隔スケジュールを式 (4.1) により算出した. 得られた角度スケジュールを Fig. 6.16 に曲線で示す. こ

Table 6.5 Optimal angular intervals at three incident angle of the reference beam.

θ_R	$\Delta\theta$ for half	$2\Delta\theta$ for full
60°	0.0465°	0.093°
75°	0.0675°	0.135°
90°	0.078°	0.156°

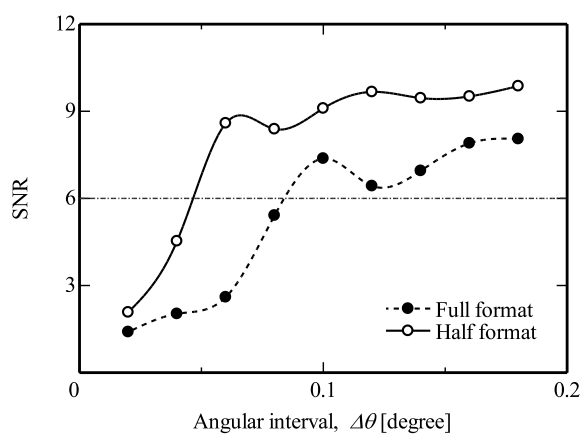
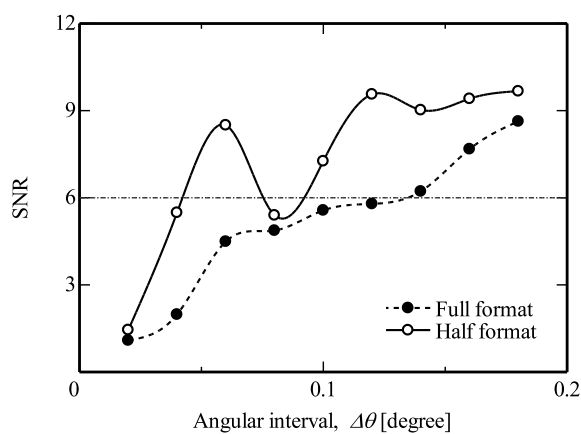
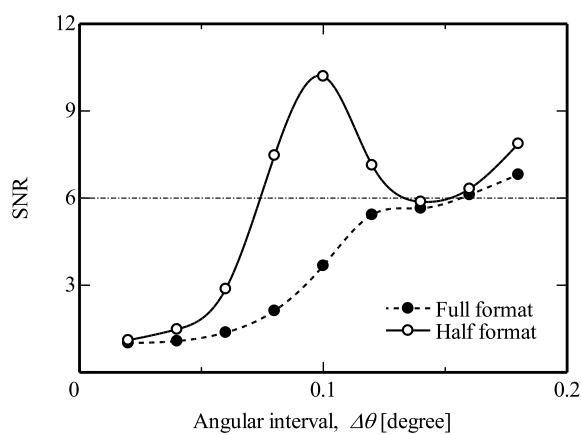
(a) $\theta_R = 60^\circ$ (b) $\theta_R = 75^\circ$ (c) $\theta_R = 90^\circ$

Fig. 6.15 Numerical results of SNR dependency on angular interval when three data pages are angularly multiplexed as shown in Fig. 5.7. The external incident angle of the reference beam, θ_R , are (a) 60° , (b) 75° , and (c) 90° .

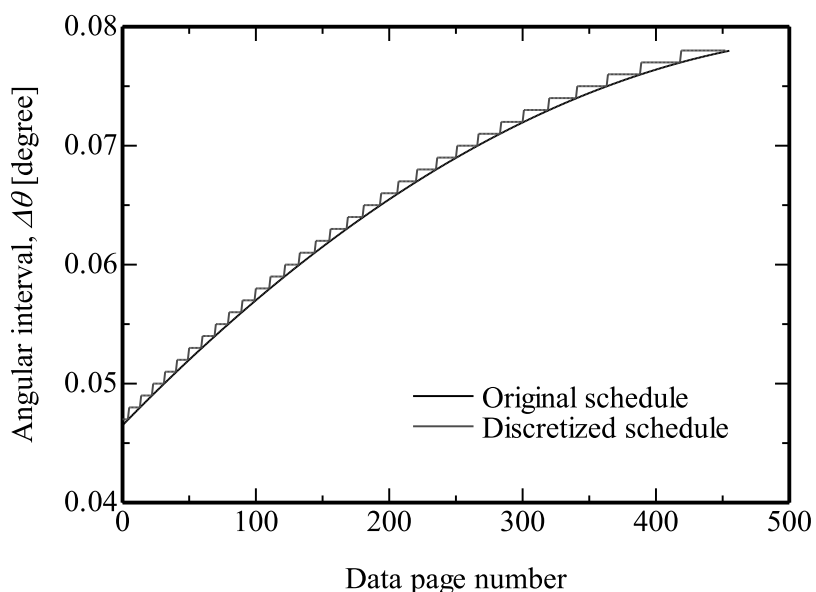


Fig. 6.16 Angular schedule for half format insertion method.

ここで，Fig. 6.16 の縦軸は full format と half format の間の角度間隔を示している．これを用いた場合，参照光入射角度の可変範囲 30° 内における多重数は 457 となる．実際の回転ステージやガルバノミラーには角度分解能が存在するため，Fig. 6.16 で与えられる角度間隔曲線を分解能の整数倍で近似した値が使用される．Figure 6.15 から，所要 SNR を満たすよう近似するには角度間隔を増す方向に端数切り上げする必要がある．角度分解能を一般的なガルバノミラー（光学振り角 40° ，角度指示階調 16 bit）が満足する 0.001° とした場合，端数切り上げで近似した角度スケジュールは Fig. 6.16 の階段状プロットとして得られる．この場合の多重数は 454 となり角度分解能を考慮しない 457 多重よりわずかに減少する．今，full と half format が交互に記録される半ページ挿入法であるから，full format のみの多重数に換算すると $m_0 = 454/4 \times 3 = 340.5$ に相当する．

一方，開口面積 S については $\chi = 1.2$ とした場合，Table 6.4 の条件を式 (2.25) に代入することで， $S = 0.0507 \text{ mm}^2$ を得る．

また，1 ページあたりのビット数 N は NRZ 符号を用いる場合，Table 6.4 の条件から $N = 336 \times 448 = 150528 \text{ bit}$ となる．

6.5 角度多重ホログラフィックメモリの記録密度算出

記録密度は式 (2.24) を用いて算出することができる。また 2.4 節でも述べたとおり、記録密度は波長 λ の 3 乗に反比例する。これらを踏まえ、波長 $\lambda = 532, 405 \text{ nm}$ の場合の記録密度および記録容量の算出結果を Table 6.6 に示す。

Table 6.6 Estimated recording density of angle-multiplexed holographic memory when using both the angular interval schedule and the half format insertion method under the conditions listed in Table 6.4.

	$\lambda = 532 \text{ nm}$	$\lambda = 405 \text{ nm}$
D [Gbit/mm ²]	1.01	2.29
D [Gbit/inch ²]	654	1480
C [Tbyte/disk]	1.14	2.59

ここで 1 ディスクあたりの容量 C を求めるにあたり、ディスク面積は現行の DVD と同様 120 mm のうち内周半径 22 mm から外周半径 58 mm までを記録可能領域としたため 9050 mm² である。波長 532, 405 nm とともに、1 ディスクあたりテラバイト級の記録容量を達成できる可能性が示された。さらなる記録密度向上には記録層厚さ T を増す、あるいは参照光の角度範囲を広げるなどが考えられる。

実際上の問題として、記録媒体と光学系での残留ノイズの存在を考慮に入れなければならない。例えば記録媒体については、重合反応時あるいは記録媒体の温度変化による体積収縮と膨張が問題となる [27–29]。ただし、記録媒体の材料は徐々に改良が進められており、極めて低い収縮率の材料も開発されつつあるため [30,31]、これからの進展が期待できる。

今後のホログラフィックメモリの実用化に向け、本研究で述べたページデータ間角度間隔制御（角度スケジューリング）とページデータ内角度間隔制御（半ページ挿入法）を活用した現実的なシステム性能の確認とともに、テラバイト級の記録容量への到達に向けた記録媒体の性能向上を進める必要があると言える。

6.6 結言

記録システム全体のパフォーマンス向上に有効な低雑音化手法を検討し、その手法を適用した場合の記録密度・容量を算出するには、ノイズの発生要因ごとにノイズ量を定量的に評価しておく必要がある。そのため、記録システム内のノイズ発生要因ごとにそのノイズ量を分離して測定する手法を提案した。

分離測定されたノイズ要因は、ノイズ量の低減が可能なものと不可避のものに分けることができる。ノイズ量の低減が可能なものについては、具体的にいくつかの低減手法が提案されているが、今回新たな手法として、FTLによる高空間周波数成分の低下を記録時に前置補償するものを提案した。実験装置における空間周波数応答特性を示し、高空間周波数成分の振幅低下を補償するための、MTFに基づく事前増強関数を定義した。事前増強関数における係数を変えながらNRZ符号のページデータを記録再生した結果、本手法を用いない場合に比べ最大80%以上のビット誤りが低減されることを確認した。

一方、角度多重ホログラフィックメモリに原理的に存在するノイズは不可避であり、このノイズ量が記録密度の上限を決定づけることから、角度多重ホログラフィックメモリの記録容量・密度を算出した。まず、第5章の数値シミュレーション結果を元に、不可避のノイズであるページ間クロストーク、矩形開口での高空間周波数成分喪失によるノイズ量を評価した。次にこれらの結果から、本研究で提案した角度間隔制御手法と半ページ挿入法を併用した場合の記録密度・容量を算出した。その結果、記録層厚さ $T = 1 \text{ mm}$ 、光源波長が $532, 405 \text{ nm}$ の場合に、1 ディスクあたりテラバイト級の記録容量を達成できる見通しが示された。

参考文献

- [1] T. Ishii, K. Shimada, S. Hughes, A. Hoskins, and K. Curtis, "Margin allocation for a 500GB holographic memory system using monocular architecture," Technical Digest of Optical Data Storage (ODS'09), pp.107-109, 2009.
- [2] C. Gu, F. Dai, and J. Hong, "Statistics of both optical and electrical noise in digital volume holographic data storage," Electronics Letters, Vol.32, pp.1400-1402, 2002.
- [3] G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, and C. M. Jefferson, "Noise reduction of page-oriented data storage by inverse filtering during recording," Optics Letters, Vol.23, pp.289-291, 1998.
- [4] T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Optical compensation of distorted data image caused by interference fringe distortion in holographic data storage," Applied Optics, Vol.48, pp.3681-3690, 2009.
- [5] M. Hara, K. Tokuyama, K. Tanaka, K. Hirooka, and A. Fukumoto, "Linear Signal Processing for a Holographic Data Storage Channel Using Coherent Addition," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, 03A025, 2009.
- [6] S. Yasuda, J. Minabe, and K. Kawano, "Optical noise reduction for dc-removed coaxial holographic data storage," Optics Letters, Vol.32, pp.160-162, 2007.
- [7] S. Yasuda, Y. Ogasawara, J. Minabe, K. Kawano, and K. Hayashi, "Homodyne readout on dc-removed coaxial holographic data storage," Applied Optics, Vol.48, pp.6851-6861, 2009.
- [8] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "High-Spatial-Frequency Pre-Enhancement for Holographic Memory," Technical Digest of International Topical Meeting on Information Photonics (IP2008), pp.68-69, 2008.
- [9] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Pre-enhancement for High Spatial Frequency in Holographic Memory," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, 09LA03, 2009.
- [10] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Evaluation of Classified Noises in Holographic Data Storage System," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'09), Tu-PP-13, 2009.
- [11] 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, "ホログラフィックメモリにおける雑音の定量的評価," 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集, 25aD8, 2009.
- [12] N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Classification and Evaluation of Noises in Holographic Memory System," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, 08KD12, 2010.
- [13] X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory," Optics Letters, Vol.20, pp.1913-1915, 1995.
- [14] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Channel codes for digital holographic data storage," Journal of the Optical Society of America A, Vol.12, pp.2432-2439, 1995.
- [15] J. W. Goodman, "Statistical Optics," Wiley, New York, 1985, p.52.

- [16] S. A.-Fernandez, C. A.-Lopez, and C.-F. Westin, "Noise and Signal Estimation in Magnitude MRI and Rician Distributed Images: A LMMSE Approach," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol.17, pp.1383-1398, 2008.
- [17] J. Salo, M. E.-Sallabi, and P. Vainikainen, "The distribution of the product of independent Rayleigh random variables," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.54, pp.639-643, 2006.
- [18] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox (Eds.), "Holographic Data Storage," Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [19] H. Faraji and W. J. MacLean, "CCD Noise Removal in Digital Images," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol.15, pp.2676-2685, 2006.
- [20] J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox, "Holographic data storage," *IBM Journal of Research and Development*, Vol.44, pp.341-368, 2000.
- [21] S. Zhang, G. Neil, and M. Shinn, "Single-element laser beam shaper for uniform flat-top profiles," *Optics Express*, Vol.11, pp.1942-1948, 2003.
- [22] S. Satoh, S. Hatori, and H. Sasaki, "Evaluation of Multiplex Hologram by Variable Pitch Spiral Method," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'04)*, Th-J-06, 2004.
- [23] N. Ishii, T. Muroi, N. Kinoshita, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Wavefront compensation method using novel index in holographic data storage," *Journal of the European Optical Society - Rapid Publications*, Vol.5, 10036s, 2010.
- [24] 近藤陽, 高畑洋介, 吉田周平, 山本学, "2次元変調符号におけるビット誤り率特性とFIRフィルタによる改善効果," *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.109, MR2009-48, pp.79-83, 2009.
- [25] T. Tanabe and I. Hatakeyama, "Data Transfer Rate of Holographic Data Storage Systems Using Write Compensation," *Technical Digest of International Workshop on Holographic Memories (IWHM2008)*, 21P-5, 2008.
- [26] J. W. Coltman, "The Specification of Imaging Properties by Response to a Sine Wave Input," *Journal of the Optical Society of America*, Vol.44, pp.468-469, 1954.
- [27] 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*, Vol.73, pp.1337-1339, 1998.
- [28] Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical evaluation of angular multiplexing in reflection-type holographic data storage in photopolymer with shrinkage," *Applied Optics*, Vol.49, pp.694-700, 2010.
- [29] M. Toishi, T. Tanaka, and K. Watanabe, "Analysis of Temperature Change Effects on Hologram Recording and a Compensation Method," *Optical Review*, Vol.15, pp.11-18, 2008.
- [30] Y. Usami, T. Sasaki, M. Kamo, S. Yamada, H. Suzuki, and M. Yumoto, "Low Shrinkage Angular Distortion after Fixing by New Holographic Recording Material," *Technical Digest of Optical Data Storage (ODS'07)*, TuEPDP1, 2007.
- [31] 羽田英司, 富田康生, "高屈折率・低重合収縮・高熱的安定性を有する無機ナノ微粒子 - ポリマーコンポジット," *日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集*, 8aE5, 2010.

第7章 結論

ホログラフィックメモリは多数のビット列からなるページデータを記録媒体の体積内に多重記録できるため、大容量・高記録密度の実現に有利である。また、一度の光照射でページデータを記録または再生できることから高転送速度にも有利である。このためホログラフィックメモリは次世代の光メモリとして有望視されており、高精細映像を扱う放送局や映画の分野だけでなく、医療機関での診療データや図書館での資料データなど大規模な情報を取り扱う分野においてその実用化が望まれている。

しかしながら、未だ実用機のリリースに至っていないのは、要素技術を統合してシステム化する際に必要な指標が明確化されていないことや、競合技術であるBDおよびその延長技術を凌駕するようなインパクトある容量・転送速度がホログラフィックメモリに求められている点にあると考えられる。

本研究では、ホログラフィックメモリの多重方式として角度多重方式にフォーカスし、記録密度向上のための新たな手法を提案するとともに、システム内において低減が不可避なノイズ量と記録密度・容量との関係を明らかにした。結果、BDの延長技術を上回るインパクトある記録密度・容量実現への見通しと、そこへ到達するための道筋について重要な知見を得た。

以下に、本研究で得られた結果を章ごとに示す。

第2章では、ホログラフィーおよびこれをメモリとして利用するホログラフィックメモリの基本的構成法と様々な多重方式の構成法について述べ、多重方式ごとの得失を挙げた。本研究では特に、機器互換性や機械精度の点において安定で、比較的高い記録密度が期待できる角度多重記録方式にフォーカスすることとし、角度多重ホログラフィックメモリによる実験装置構成法を詳述した。また角度多重ホログラフィックメモリの記録密度 D が、角度多重数 m と矩形開口面積 S 、1 ページデータあたりのビット数 N で決定されることに基づき、従来よりも記録密度を向上させるための指針を得た。

第3章では、本論文で提案する記録密度向上手法の検証に不可欠となる、ホログラフィックメモリの数値シミュレーション手法について述べた。具体的には有限差分時間領域法とスカラー回折理論に基づく手法について、解の収束を検証し、結合波理論、厳密結合波解析などの従来手法と比較することにより、構築したシミュレータの有効性を確認した。有限差分時間領域法によるシミュレーション手法はフルベクトル解析であり多重回折の扱いも可能であるため汎用性が高く、媒体に気泡などの欠陥がある場合や光の偏光を制御するホログラフィックメモリの特性解析に有効である。一方、スカラー回折理論に基づく手法は媒体を層分割し、各層を順に扱うため比較的計算機メモリを必要とせず、ホログラフィックメモリなど小さな屈折率変調振幅を有する解析モデルに対して高速に解を得ることが可能である。そこで本研究における数値シミュレーション手法としてスカラー回折理論に基づく手法を採用した。なお、記録層を分割し、スカラー回折理論に基づく計算を行う手法として、信号光軸と参照光軸を含む面内で記録媒体を傾斜回転させたモデルの解析は過去に例がなく、新たに開発した手法である。

第4章では、多重度と記録密度を向上するため、ホログラムごとに角度間隔を適応制御する手法を提案した。三つの媒体角度における角度選択曲線の半値幅に基づいた角度間隔スケジュールの場合、残留クロストークノイズがみられた。これはフォトポリマー材料の光重合反応に伴う体積収縮に起因するものと考えられる。このため角度選択曲線の第一極小点において回折効率が十分低くならず、角度選択性の半値幅実測値や数値シミュレーション結果だけから最適な角度間隔を決定するのは困難であるとわかった。そこで、角度間隔スケジュールの補正を図ることにより、媒体厚さ $T = 1 \text{ mm}$ 、レーザー波長 532 nm 、角度多重数 $m = 300$ という条件下で、全てのページデータにわたり 10^{-4} 台以下の BER を得た。従来の角度多重ホログラフィックメモリは一定の角度間隔でホログラムを角度多重していたが、一定角度間隔で 10^{-4} 台の BER を得るには角度間隔を本手法より広く設定する必要があることから、本手法により多重数と記録密度が向上したと言える。

第5章では、ページデータ内での角度選択性の差異を積極的に活かすことで多重数 m を向上する手法について述べた。矩形開口面積 S の低減は記録密度向上に有効であり、そのためにレンズの焦点距離 f を短くすることが求められる。レンズ焦点距離 f を短くした場合、1つのページデータ内の場所ごとで角度選択性に大きな差異を生じ

る．提案手法は full format , half format のページデータを用意し，これらを交互に角度多重記録する半ページ挿入法であり，半分の大きさのページデータを従来のホログラム角度間隔の間に挿入することに相当するため，記録密度を向上することができる．まず数値シミュレーションにより両フォーマットの角度選択性を調べ，half format が full format よりも狭い角度間隔で記録可能であることを確認した．次に，一つの full format ホログラムの角度方向正負両側に full または half format のホログラムが記録された場合における角度間隔対 SNR の関係を数値シミュレーションにより求めた．ある一定の SNR 値を満たす条件から，所望の角度間隔を見積もった．さらに，full format と half format のページデータを計 19 枚用意し，それぞれ交互に角度多重記録した．これは half format を 2 つの full format 間に挿入して記録するので，最大で従来比 1.5 倍の記録密度向上を意味する．記録再生実験の結果， 10^{-3} 台前半の BER が得られ，実用上誤り訂正可能な範囲であることから本提案手法の有用性が確認された．

第 6 章では，ホログラフィックメモリシステム内におけるノイズ要因を列挙し，それぞれのノイズ要因ごとにその量を分離して測定できる手法を提案した．分離測定されたノイズ要因は，ノイズ量の低減が可能なものと不可避なものに分けることができる．ノイズ量の低減が可能なものについては，具体的にいくつかの低減手法が提案されているが，今回新たな手法として，レンズによる高空間周波数成分の低下を記録時に前置補償するものを提案した．実験装置における空間周波数応答特性を示したのち，高空間周波数成分の振幅低下を補償するための，光学伝達関数に基づく事前増強関数を定義した．事前増強関数における係数を変えながら記録再生した結果，本手法を用いることで，用いない場合よりも最大で 80% 以上のビット誤りが低減できることを確認した．

一方，角度多重ホログラフィックメモリに原理的に存在するノイズは不可避であり，このノイズ量が記録密度の上限を決定づけることから，角度多重ホログラフィックメモリの記録容量と記録密度を算出した．まず，第 5 章の数値シミュレーション結果を元に，不可避のノイズであるページ間クロストーク，矩形開口での高空間周波数成分喪失によるノイズ量を評価した．これらの結果から，本研究で提案した角度間隔制御手法と半ページ挿入法を併用した場合の記録密度・容量を求めた．その結果，波長が 532, 405 nm の場合とも，1 ディスクあたりテラバイト級の記録容量を達成できる見通しが示された．

以上のように，本論文では角度多重ホログラフィックメモリにおける多重数増加および記録密度向上のための手法を提案し，これを数値シミュレーションと実験により検証した．さらに，角度多重ホログラフィックメモリに原理的に存在するノイズ下での記録容量・密度を算出した結果，競合技術であるBDおよびその延長技術を十分凌駕できる可能性が示された．この実現のためには，低減可能なノイズ要因を如何に抑え込むことができるか，が鍵となるであろう．本論文ではノイズ低減手法の一つとして高空間周波数成分の増強を提案しているが，その他様々なノイズ低減手法を用いることが肝要である．

特に，現在最も解決すべき課題とされているのが記録媒体に用いるフォトポリマー材料の性能である．重合反応に伴う体積収縮と温度変化に伴う膨張・収縮はノイズ源となるため，これを抑制することが求められる．収縮・膨張の抑制と，記録材料の多重可能数や感度の向上はトレードオフの関係にあるが，近年になり記録材料の改良が徐々に進められ，極めて低い収縮率の材料も開発されつつある．

一方，再生ページデータ画像処理や誤り訂正などの信号処理系は，ノイズが残留する信号に対して最終的なBERを決定するという点で重要な役割を担う．画像処理としてのノイズ低減アルゴリズムは映像や静止画を扱う分野で既に実用化されているが，ホログラフィックメモリに特化したアルゴリズムは必ずしも完成したとは言えない．また，ホログラフィックメモリの誤り訂正符号として最も有望視されている低密度パリティ検査符号は，従来のReed-Solomon符号などと比べ大きな回路規模を必要とするが，一般的に符号長を長くするほど，つまり回路規模を大きくするほど誤り訂正能力が向上する．従って，日進月歩で進む半導体技術の発展と回路規模の増大により，ノイズ耐性の向上が見込まれる．

今後，システムを構成する光学系，記録媒体，信号処理系の各要素技術においてノイズ低減あるいはノイズ耐性が大きく進展し，本研究で示した記録密度・容量を達成できるホログラフィックメモリが早期に実用化されることを期待したい．

謝辞

本研究の遂行と本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な御指導，御鞭撻を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科 的場修 教授に深甚な感謝の意を表します．

本論文の執筆に際しましては，御多忙中にも関わらず御校閲を賜り，また有益な御教示を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科 賀谷信幸 教授，神戸大学大学院工学研究科 喜多隆 教授に心より厚く御礼申し上げます．

神戸大学大学院システム情報学研究科 仁田功一 准教授には貴重な御助言と有益な御議論を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

本研究の遂行にあたり，その機会と環境を提供して頂いた，日本放送協会 放送技術研究所の歴代所長をはじめとする同研究所の多くの方々に深く感謝いたします．特にこの研究の発表を許可され，多大なる御支援を賜った久保田啓一 所長に厚く御礼申し上げます．表示・機能素子研究部 清水直樹 部長，菊池宏 主任研究員には多大なる御支援と御配慮を頂くとともに，直属の上司として熱心かつ的確に御指導いただきました．ここに深く感謝いたします．また，多大な御助言を頂いた栗田泰市郎 元部長（現情報通信研究機構出向），時任静士 前部長（現山形大学教授）に深謝いたします．

実験の遂行にあたっては，同研究所の上條晃司 主任研究員，石井紀彦 専任研究員，室井哲彦 研究員，日本放送協会 大阪放送局 椎野弘崇 職員に多大なる御助力と熱心な御討論を頂きました．また，数値シミュレータ構築にあたっては同研究所 三浦雅人 研究員に多大なる御助言を頂きました．ここに深く感謝いたします．東亜合成株式会社の服部覚 氏，佐藤伸 氏，新日鐵化学株式会社の正木一嘉 氏，安藤敏男 氏，清水健博 博士には，記録媒体のサンプル作成で御協力賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．

終わりに，本論文の執筆に際し妻 友希子と息子 湊介，結士郎の多大なる支え，励ましがあったことをここに記し，感謝の意を表します．

平成 23 年 1 月

木下 延博

本論文に関する発表論文，学術講演

発表論文

1. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Integrated Simulation Technique for Volume Holographic Memory Using Finite-Difference Time-Domain Method," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, pp.3503-3507 (2005).
2. 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, Vol.48, pp.03A029.1-03A029.4 (2009).
3. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Pre-enhancement for High Spatial Frequency in Holographic Memory," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, pp.09LA03.1-09LA03.4 (2009).
4. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Classification and Evaluation of Noises in Holographic Memory System," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, pp.08KD12.1-08KD12.2 (2010).
5. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, H. Kikuchi, N. Shimidzu, and O. Matoba, "Half data page insertion method for increasing recording density in angle-multiplexed holographic memory," Applied Optics, [accepted].

学術講演 (国際会議)

1. N. Kinoshita, N. Ishii, N. Shimidzu, K. Kamijo, and S. Nakamura, "3-D FDTD Simulation for Volume Holographic Gratings," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'04), We-G-10 (Oct. 2004).

2. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Angular interval scheduling for angle-multiplexed holographic data storage," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS'08), TuP10 (July 2008).
3. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "High-Spatial-Frequency Pre-Enhancement for Holographic Memory," Technical Digest of International Topical Meeting on Information Photonics (IP2008), p1-15 (Nov. 2008).
4. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, and N. Shimidzu, "Evaluation of Classified Noises in Holographic Data Storage System," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'09), Tu-PP-13 (Oct. 2009).
5. N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo, N. Shimidzu, T. Ando, K. Masaki, and T. Shimizu, "Angle Scheduling for Divided Datapage Regions in Angular Multiplexing Holographic Memory," Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM'10), Th-M-03 (Oct. 2010).

学術講演 (国内学会)

1. 木下延博, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, 中村昇一, "ホログラム記録における回折効率の FDTD 解析," 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 1-3 (Aug. 2004).
2. 木下延博, 石井紀彦, 椎野弘崇, 清水直樹, 上條晃司, "ホログラム記録における角度選択性の FDTD 解析," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集, C-3-81 (Sep. 2004).
3. 木下延博, "デジタルホログラム再生の FDTD シミュレーション," 第 2 回ボリュームホログラフィックメモリ技術研究会 (Feb. 2005).
4. 木下延博, 椎野弘崇, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, "有限差分時間領域法のホログラム解析への適用," 電子情報通信学会技術研究報告 (MR, 磁気記録), Vol.104, MR2004-69 (Mar. 2005).

5. 木下延博, 椎野弘崇, 室井哲彦, 石井紀彦, 清水直樹, 上條晃司, ”スペックル参照光を用いた角度多重ホログラム記録,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 6-8 (Aug. 2006).
6. 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, ”スペックル参照光を用いた角度多重ホログラムの実験的評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (MR, 磁気記録), Vol.106, MR2006-63 (Dec. 2006).
7. 木下延博, 石井紀彦, 室井哲彦, 上條晃司, 清水直樹, ”ホログラフィックメモリ用変調テーブルの一構成法,” 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 8-4 (Aug. 2007).
8. 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, ”ホログラフィックメモリにおける雑音の定量的評価,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集, 25aD8 (Nov. 2009).
9. 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, 仁田功一, 的場修, ”データ領域制御による角度多重ホログラムの高密度化,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-7-3 (Mar. 2010).
10. 木下延博, 室井哲彦, 石井紀彦, 上條晃司, 清水直樹, ”角度多重ホログラフィックメモリの密度向上技術,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 講演予稿集, 9pAS2 (Nov. 2010).