

博士論文

コリニアホログラフィー

堀米 秀嘉

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.1.1	アーカイブストレージにおける光ディスクメモリーへの期待	1
1.1.2	ホログラフィック光メモリーの優位性と課題	2
1.1.3	コリニアホログラフィーの考案と本研究の目的	4
1.2	本論文の構成	5
第2章	コリニアホログラフィーの原理	9
2.1	はじめに	9
2.2	ホログラフィック光メモリーの基礎技術	10
2.2.1	ホログラム記録媒体	10
2.2.2	多重記録再生技術	12
2.3	コリニアホログラフィーによる記録再生方法と原理実証	16
2.4	コリニア方式による光メモリー実用化の基本技術	19
2.4.1	基本コンセプトの検討	19
2.4.2	コリニア基本光学系	21
2.4.3	ページデータの基本フォーマット	24
2.5	コリニア方式による体積的な干渉縞の形成	27
2.5.1	コリニア方式で形成される干渉縞のシミュレーション	27
2.5.2	光学的直接観察によるシミュレーションの検証	32
2.5.3	厚いホログラム記録媒体への均質な露光の実現手法	35
2.6	まとめ	38
第3章	コリニア方式の記録再生特性	40
3.1	はじめに	40
3.2	コリニア方式記録再生特性評価装置：S-VRD	41
3.2.1	システムの全体構成	41
3.2.2	ページデータ記録再生による SNR 特性の評価	43
3.3	コリニア方式によるシフト選択性	45
3.3.1	再生位置の移動量に対する再生信号強度の評価	45
3.3.2	コリニアシフト多重方式の記録再生原理実証	47

3.4	データページのエラー解析	50
3.4.1	バーストエラーの判定とエラー部の画像観察	50
3.4.2	数値計算シミュレーションによるノイズ発生原因の推定	54
3.5	コリニアシフト選択性の数値シミュレーション解析	56
3.6	まとめ	58
第4章	コリニア方式のシステムマージン	61
4.1	はじめに	61
4.2	デフォーカスマージン	62
4.3	デトラックマージン	63
4.4	イメージプレーンマージン	64
4.5	チルトマージン	66
4.5.1	絶対値チルトマージン	66
4.5.2	相対値チルトマージン	67
4.6	波長マージン	68
4.6.1	波長シフトマージン	69
4.6.2	波長スペクトラムマージン	71
4.6.3	コヒーレント長マージンの考察	74
4.7	超小型コリニア光学ヘッドの実現化検討	75
4.8	まとめ	77
第5章	データストレージシステム：HVD	78
5.1	はじめに	78
5.2	ホログラフィック光ディスク：HVD の構造	78
5.3	コリニア方式ドライブシステム：ES-1	83
5.4	HVD の物理フォーマットとページデータ記録再生シーケンス	87
5.5	On the Fly 記録再生実験	91
5.6	まとめ	95
第6章	光フェーズロックコリニア方式	97
6.1	はじめに	97
6.2	光フェーズロックコリニア方式の基本原理	98
6.2.1	基本原理と記録再生実証実験	98
6.2.2	光フェーズロック方式の記録再生実験光学系	101
6.2.3	光フェーズロック方式のページデータ構造（基本原理実験用） ..	102

6.2.4 位相多値ページデータの記録再生プロセス	104
6.3 光フェーズロックによる位相多値階調の記録再生実験	106
6.3.1 4 値位相階調の記録再生基礎実験	106
6.3.2 位相値エラーの要因分析	108
6.4 光フェーズロック方式の位相多値階調記録再生特性	108
6.5 位相コード化多重記録再生の基礎原理実証	110
6.6 まとめ	113
第7章 ホログラフィック3D プリンター	116
7.1 はじめに	116
7.2 コリニア方式によるリップマン型ホログラムの露光形成原理	117
7.3 フルパララックス3D 画像のホログラム記録再生原理	119
7.4 ホログラフィック3D プリンターシステム：CDP-1	120
7.5 CDP-1 による3D 画像の露光印刷	122
7.6 まとめ	124
第8章 総括	126
付録 A 偏光コリニアホログラフィー	132
A.1 はじめに	132
A.2 光磁気ホログラフィーと偏光分離再生原理	132
A.3 偏光コリニアホログラフィーの基本原理	134
A.4 偏光コリニアホログラフィーの基礎原理実証実験結果	137
A.5 考察 および 得られた知見	138
付録 B Pixel Spread Function：PxSF	140
B.1 はじめに	140
B.2 コリニア方式の数値モデル化	140
B.3 コリニア方式における再生特性の数値計算結果	144
B.4 Pixel Spread Function (PxSF)	145
B.5 PxSF を用いた参照光パターンの評価結果	146
B.6 まとめ	148

謝辞

研究業績リスト

第1章

序論

1.1 本研究の背景と目的

1.1.1 アーカイブストレージにおける光ディスクメモリーへの期待

近年のインターネット環境とモバイル通信環境の急激な発達などにより、2010年には全世界の年間デジタルデータ生産量はZB（ゼタバイト：1 ZB = 1,000 EB = 1,000,000 PB = 1,000,000,000 TB）のオーダーに達し、また、2020年には、年間40ZBを超える情報が生産されると予想されている[1]。その後もこの情報量の爆発的な増大は更に進むと考えられる。しかし、このような膨大な情報のうちの80%は、情報をアーカイブデータとして長期保管しなければならないもので、クラウドなどに代表されるデータセンターでは、アーカイブのための費用の増大が大きな問題となっている。

アーカイブに要する費用は、ストレージシステムのビット単価だけでは決まらず、記録メディアの信頼性確保のためのメンテナンスや交換費用、ストレージ用ドライブシステムの経年による交換のほか、運用するために必要な電力消費量や冷却に必要な電力消費量、さらに保管するための場所のフットプリントから割り出される費用などを総合した、TCO（Total Cost of Ownership）で計られなければならない。特に、長期保存するためだけのアーカイブデータに電力を供給し続けなければならない状況は、非常に深刻な問題となっている。最近、大手通信事業者の一つ Facebook が、光ディスクストレージの持つ長期間保存性と低消費電力の特徴に着目し、「コールドストレージ」として Blu-ray Disc を用いたアーカイブストレージシステムを試験運用したことからも、この問題の大きさをうかがい知ることができる。

しかし、現在もマルチレイヤー構造の実現や両面化技術などにより大容量化が進展している Blu-ray

Disc においてさえも、図 1 (a) に示すように、記録再生方法は Bit by Bit 記録再生方式のままのため転送レートには限界があり、光ファイバー直結型の超高速データ転送レートに対応するために幾つかの試みが成されている。例えば、ディスクを両面構造にして光ヘッドを複数配置できるようにし、更にこれのドライブを並列に複数台接続して並列して記録再生を行なっている。その結果、装置は複雑化し、光ディスク本来のメリットが失われている。以上のため、超高速で大容量、かつ記録媒体の交換が容易で、任意のデータへランダムアクセス可能な、新しい光ディスク型のデータストレージシステムの実用化が待ち望まれている。

1.1.2 ホログラフィック光メモリーの優位性と課題

一方、図 1 (b) に示すように、ホログラフィック光メモリーでは、2 次元的にデータが配列されたページデータを一括して記録再生が可能であるため、データ転送速度を飛躍的に向上できるほか、体積的な記録媒体へ多重記録を行なうことができるため、超高密度で大容量の記録が実現できるという潜在能力を持っている。そのため、この理想的なホログラフィック光メモリーをデータストレージシステムとして実用化すべく、1960 年代から現在まで、世界中で研究開発が続けられてきている[2-18]。

ホログラフィック光メモリーの研究開発では、図 2 に示すような二光束干渉光学系を採用している例が多い。情報の記録は、図 3 に模式的に示すように、2 次元的なページデータを空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) に表示してこれを対物レンズ (Obj. Lens 1) で記録材料へ集光することで信号光 (Signal Beam) とし、これに斜めの方向から参照光 (Reference Beam) を重ね合わせるように入射することで干渉縞の記録が行なわれる。

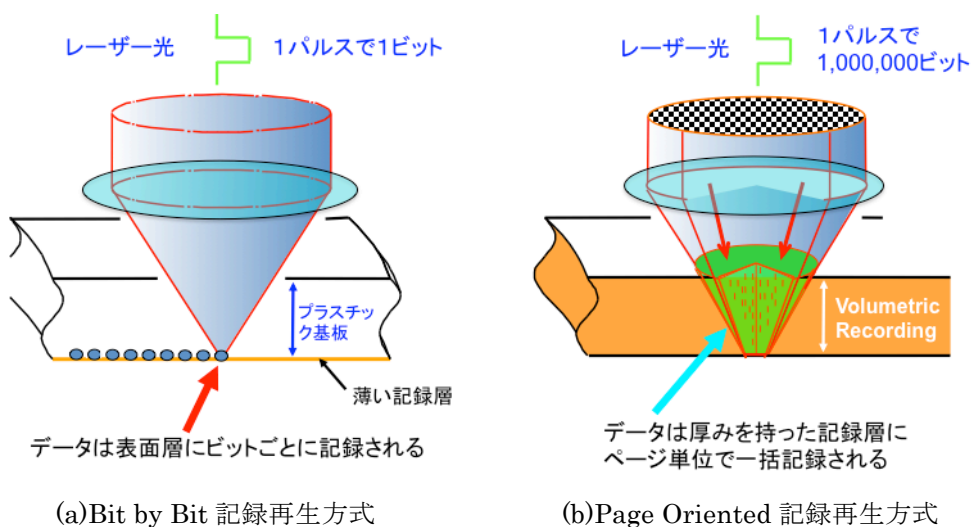


図 1 従来の光ディスクの記録再生方式 (a) と ホログラム記録再生方式 (b) の比較

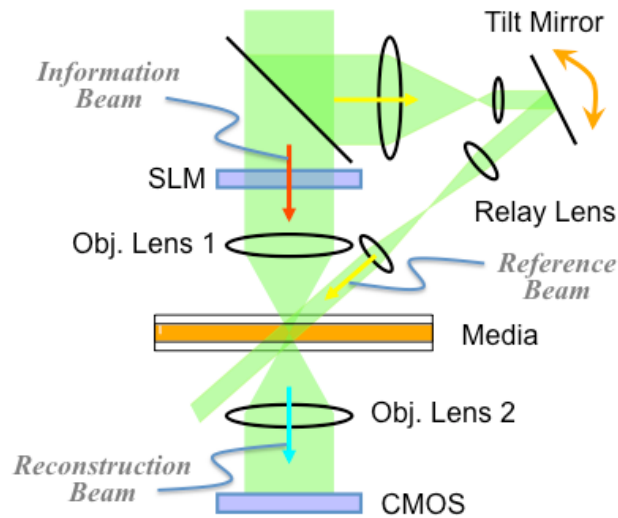


図 2 二光束干渉法によるホログラム記録再生光学系（角度多重記録方式）

記録密度を向上させるには、例えば、Tilt Mirror の角度を変化させて他のページデータを同一場所に記録する角度多重方式などが用いられている[19]。情報の再生は、図 4 に示すように、参照光のみを記録されたホログラムに照射することで、記録材料の反対側に置かれた対物レンズ（Obj. Lens 2）を通して CMOS センサーでページデータが検出される。多重記録されたページデータは、参照光の角度を変えることにより、独立したページデータとして読み出される。

しかしながら、これまで提案されてきたホログラフィック光メモリーでは、記録媒体の交換性（リムーバビリティ）やドライブ間の互換性（インターチェンジャビリティ）、更に任意のデータへの容易なランダムアクセス性など、データストレージシステムを実現する上で必要となる周辺の要素技術に関しては、あまり積極的に研究開発が成されてこなかったように思われる。

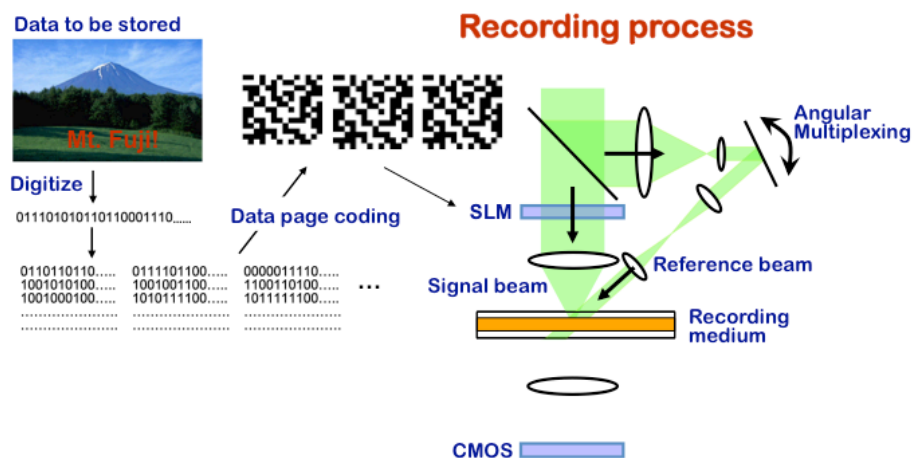


図 3 2次元ページデータのホログラム記録プロセス

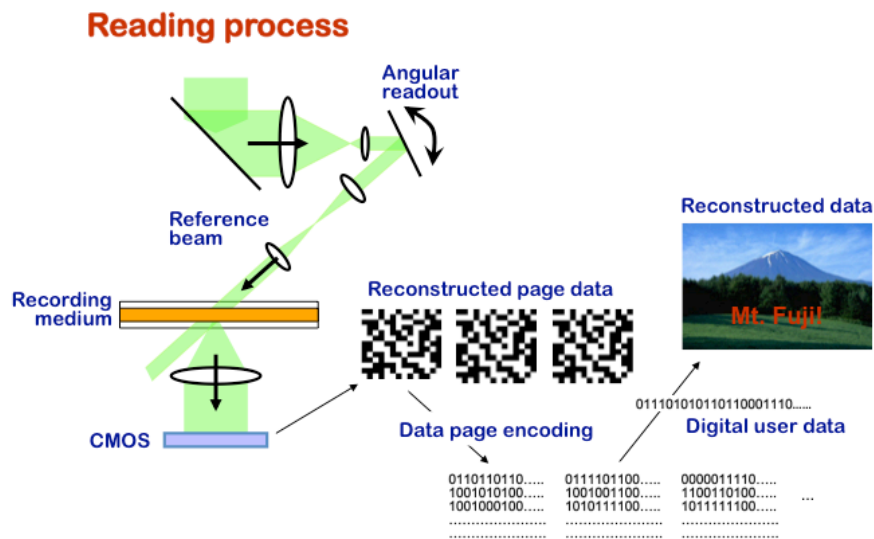


図 4 2次元ページデータのホログラム再生プロセス

1.1.3 コリニアホログラフィーの考案と本研究の目的

このような背景のもと、光ディスクとホログラフィーという対照的な二つの光メモリー技術を注意深く観察すると、実は光ディスクにおいても「光の干渉」技術を巧みに応用していることが浮かび上がってきた。例えば、光ディスクメモリーでは、情報を担持する微小なピットは $\lambda/4 \sim \lambda/8$ の位相を持つピットとして形成されており、その信号検出方法と光サーボ技術には、0次光と ± 1 次回折光の位相干渉による強度変調信号の検出が用いられている[20-21]。その結果、光ディスクが高速回転して面ぶれや偏心などにより記録媒体の位置が変化していても、対物レンズの焦点面の光スポットは20nm オーダーの高い位置精度でこの光ディスクに追従しており、正確な記録再生を実現させているのである。すなわち、光ディスクメモリーにおいても、その実用化を支えてきたのはホログラフィックな光の干渉技術であると言える。

これを逆説的に考えてみると、光ディスクメモリーに広く採用されている光サーボ技術を応用すれば、ダイナミックに動いている記録媒体に対しても、20nm オーダーの相対位置精度で追従させることが可能となり、安定した干渉縞の形成が可能になるのではないかと考えた。

そこで、光ディスクと同じように、平行に進む一本の光でホログラムの記録再生を行なう方法を試行錯誤した結果、最終的に、たった一つの対物レンズを通してホログラムの記録および再生を行なう方法「コリニアホログラフィー」の考案に至った[22-23]。図5に二光束干渉方式と比較して示すように、一本の光でありながら、記録媒体中で位相干渉を起こさせる本技術は、ホログラフィック光データストレージシステムのみならず、ホログラム技術を応用する全般的な分野に応用が可能であり、これまで不可能とされていたさまざまな課題にブレークスルーを与える要素技術であると考えている。

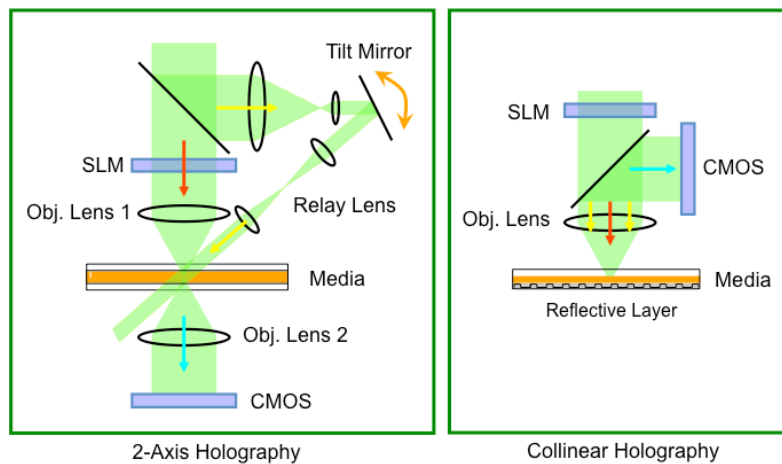


図 5 二光束干渉方式とコリニアホログラフィー方式の光学系構成の比較模式図

本研究では、コリニアホログラフィーの基本原理を述べるとともに、これを実用的なホログラフィック光データストレージシステムにまで発展させることを目的とした。具体的には、光ディスクと同じ手軽さでハンドリングが可能で、ホログラフィック光メモリーのもつ超高速大容量の特徴を備えた新しい方式を原理的に実証するとともに、ホログラフィック光データストレージシステムをプロトタイプレベルで試作開発し、その有効性を示すことを目指して研究を行った。また、近い将来の情報量の爆発的な増大にも適用するために、ページデータに位相情報を含めて取り扱う「光フェーズブロックコリニア方式」も考案し、更なる記録密度の向上と超高速データ転送レートへの対応可能性も示した。

更に、ホログラム技術を用いて3次元立体画像を露光印刷する、いわゆる「ホログラフィック3D画像プリンターシステム」にもコリニアホログラフィーが応用可能であることを、試作開発を通して示した[24-25]。

1.2 本論文の構成

平行に進む一本の光とたった一つの対物レンズにより、ホログラムの記録再生を可能にしたコリニアホログラフィーは、これまで例のなかった「ホログラム技術」と「光ディスク技術」を融合させることに成功した。そのため、本論文では、まず、コリニアホログラフィーの原理を述べるとともに、基本コンセプトからプロトタイプドライブシステムの構築までを一貫して記述した。また、実証された記録再生実験結果は、それぞれの研究開発ステージにおいて示した。更に、ホログラフィック3D画像プリンターシステムについて、その露光原理を述べるとともに試作開発結果を示し、コリニアホログラフィーが光データストレージ以外にも応用可能であることを示した。

本論文の主な構成は以下のとおりである。

第2章では、コリニアホログラフイーの原理について述べる。

コリニアホログラフイーによるホログラムの記録再生原理を説明し、実際にホログラムの記録再生を行なった実証実験結果を示す。次に、ホログラフィック光メモリーを実現するための基本技術について述べる。また、シミュレーション手法を用いてコリニア方式によって形成される干渉縞を可視化した結果について述べる。更に、コリニア方式において厚みを持った体積的な記録材料へ有効に干渉縞を形成する技術についても言及する。

第3章では、高密度記録再生方法の検討について述べる。

コリニア方式による記録再生特性を評価するために開発した実験装置：S-VRD について概説する。また、この装置を用いてコリニアホログラフイーに特有のシフト選択特性の測定結果について示すとともに、シフト多重記録再生を試みた、世界で初めての実証実験結果についても示す。更に、コリニア方式を数値モデル化し、計算シミュレーションによるホログラムの再生ページデータ内に発生するノイズの解析と、シフト選択性の挙動についての解析を行なった結果についても示す。

第4章では、コリニア方式のシステムマージンについて述べる。

実用的なホログラフィック光ストレージシステムの設計指針を構築するために、コリニア方式において重要なシステムマージン項目を洗い出し、それぞれのマージンの値を実験により評価した結果を示す。また、記録再生時の波長シフトに関係する波長マージンの評価結果に基づき、マルチモード発振した青色半導体レーザーを用いたコリニア方式ページデータ再生実験の結果についても示す。

第5章では、HVD への On the Fly 記録再生について述べる。

回転する光ディスクへ連続的にホログラフィックページデータを記録再生するための要素技術と、ホログラフィック光ディスク：HVD (Holographic Versatile Disc) の記録媒体構造について述べる。また、コリニア方式の特徴を全て融合して試作開発されたプロトタイプドライブシステム：ES-1 (Engineering Sample #1) のシステム構成と記録再生シーケンスについて概説する。更に、この ES-1 と HVD を用いて、300 rpm で連続回転させながら HVD 全面に On the Fly 記録再生を実現した結果を、エラーレート解析結果によって示す。

第6章では、光フェーズロックコリニア方式について述べる。

コリニアホログラフイーの特徴であるコモンパス光学系を用いることで、光の位相多値階調情報を安定して記録再生する、光フェーズロックコリニア方式の基本原理を述べるとともに、基礎実験光学系の構成と記録再生用ページデータの構成について説明する。また、光フェーズロック方式により、1画素あたりに32階調(5 bit)もの情報を付加した、世界で初めての実験結果について示す。更に、参照光を位相コード化して、同じ位置に複数の位相多値ページデータを多重記録再生した基礎原理実証実験結果について示す。

第7章では、ホログラフィック3Dプリンターについて述べる。

物体光と参照光の偏光方向を直交させ往路と復路の偏光を制御することで、リップマン型ホログラ

ムの露光形成を実現した偏光コリニアホログラフィー技術の原理を述べるとともに、この技術を用いて開発されたホログラフィック 3D プリンター：CDP-1 の概要を示す。また、相対速度 20mm/sec で連続移動する記録媒体に対して、部分ホログラムを露光印刷して形成した高解像度 3D 立体画像の露光印刷結果について示す。これにより、コリニアホログラフィーがホログラフィック光メモリー以外の用途においても利用可能であることを示すとともに、コリニアシフト多重による記録は 3D 画像の高解像度化に有効であることも示す。

第8章では、本論文を総括する。

本研究で得られた成果を要約するとともに、コリニアホログラフィーの今後の課題と展望を述べる。

参考文献

- [1] 例えば、「2020 年のデジタルデータ量は 40 ゼタバイトに拡大と推定」
<http://hdl.handle.net/11035/2367>
- [2] L.K. Anderson, “Holographic Optical Memory for bulk data storage,” Bell Laboratories Record, **45**, 319-326 (1968).
- [3] J. Lipp and J. Reynolds, “A high capacity holographic storage system,” in Applications of Holography, E.S. Barrakette et al., Eds. New York: Plenum Press, 377-388 (1970).
- [4] W.C. Stewart, R.S. Mezrich, L.S. Cosenting, E.M. Nagle, F.S. Wendt and R.D. Lohman, “An experimental read-write holographic memory,” RCA Rev., **34**, 3-44 (1973).
- [5] W.H. Strehlow, R.L. Dennison and J.R. Packard, “Holographic data store,” J. Opt. Soc. Am., **64**, 543-544 (1974).
- [6] L. d’Auria, J.P. Huignard, V.C. Slezak and E. Spitz, “Experimental holographic read-write memory using 3-D storage,” Appl. Opt., **13**(4), 808-818 (1974).
- [7] N. Nishida, M. Sakaguchi, and F. Saito, “Holographic coding plate: a new application of holographic memory,” Appl. Opt., **12**(7), 1663-1674 (1973).
- [8] A. Bardos, “Wideband holographic recorder,” Appl. Opt., **13**(4), 832-840 (1974).
- [9] Y. Tsunoda, K. Tatsuno, K. Kataoka and Y. Takeda, “Holographic videodisk: an alternative approach to optical videodisks,” Appl. Opt., **15**(6), 1398-1403 (1976).
- [10] K.K. Sutherlin, J.P. Lauer, and R.W. Olenick, “Holoscan: a commercial holographic ROM,” Appl. Opt., **13**(6), 1345-1354 (1974).
- [11] A. Mikaeliane, “Holographic bulk memories using lithium niobate crystals for data recording,” in Optical Information Recording, **2**, E.S. Barrekette et al., Eds, New York: Plenum Press,

- 217-233 (1978).
- [12] K. Kubota, Y. Ono, M. Kondo, S. Sugama, N. Nishida and M. Sakaguchi, “Holographic disk with high data transfer rate: its application to an audio response memory,” *Appl. Opt.*, **19**(6), 944-951 (1980).
 - [13] I. Sato, M. Kato, K. Fujito and F. Tateishi, “Holographic memory system for Kanji character generation,” *Appl. Opt.*, **28**(13), 2634-2040 (1989).
 - [14] M.P. Bernal, H. Coufal, R.K. Grygier, J.A. Hoffnagle, C.M. Jefferson, R.M. Macfarlane, R.M. Shelby, G.T. Sincerbox and G. Wittmann, “A precision tester for studies of holographic optical storage materials and recording physics,” *Appl. Opt.*, **35**(14), 2360-2374 (1996).
 - [15] J. Heanue, M. Bashaw and L. Hesselink, “Volume holographic storage and retrieval of digital data,” *Science*, **265**, 749-752 (1994).
 - [16] G. Zhou, Y. Qiao, F. Mok, and D. Psaltis, “A holographic memory product for fingerprint identification,” *Opt. Photonics News*, March, 43 (1996).
 - [17] I. Michael, W. Christian, D. Pletcher, T.Y. Chang, and J.H. Hong, “Compact holographic storage demonstrator with rapid access,” *Appl. Opt.*, **35**(14), 2375-2379 (1996).
 - [18] 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,” *Opt. Lett.*, **22**(9), 639-641 (1997).
 - [19] L. d’Auria, J.P. Huignard and E. Spitz, “Holographic read-write memory and capacity enhancement by 3-D storage,” *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-9**(2), 83-94 (1973).
 - [20] G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink, “Principles of Optical Disc Systems,” Adam Hilger Ltd., (Bristol and Boston, 1985).
 - [21] W. Liu and M. W. Kowarz, “Vector diffraction from subwavelength optical disk structures: two-dimensional modeling of near-field profiles, far field intensities, and detector signals from a DVD,” *Appl. Opt.*, **38**, 3787-3797 (1999)
 - [22] 堀米秀嘉, “光情報記録装置、光情報再生装置および光情報記録再生装置,” 特許第 3403068 号 (1998.2.27 出願).
 - [23] 堀米秀嘉, “光情報記録装置および方法、光情報再生装置および方法、ならびに光情報記録再生装置および方法,” 特許第 3639202 号 (2000.10.16 出願).
 - [24] 堀米秀嘉, “ホログラム作成装置および方法,” 特許第 3729477 号 (1998.2.27 出願).
 - [25] 堀米秀嘉, “ホログラム作成装置及びホログラムプリンタ,” 特許第 5201580 号 (2008.6.6 出願).

第2章

コリニアホログラフィーの原理

2.1 はじめに

Gabor によって提案されたホログラフィーは、参照光と情報光が同軸上に伝搬する In-Line 型の配置であったことは有名である[1]。しかし、参照光が情報光に混ざり合ってしまう2重像が発生してしまうという問題があったため、その後、Leith と Upatnieks によって、参照光と情報光が所定の角度を持つ Off-Axis 型、いわゆる二光束干渉法が考案された[2]。ホログラフィック光メモリーの基本コンセプトを提唱した van Heerden においても[3]、この二光束干渉法を用いた角度多重が用いられていた。

一方、筆者は、ホログラフィック光メモリーを CD や DVD のような、手軽にハンドリングできる光ディスクメモリーとして実現できないものかと考えたため、Gabor による最初のホログラフィーのように、In-Line 型の光学配置を基本形として模索した。その結果、たった一つの対物レンズを通して情報の記録再生を行う「コリニアホログラフィー」の考案に至った[4]。当初は、光路中に複合旋光板という光学素子を挿入して参照光と情報光を偏光により分離する方式を検討していたため、この方式を「偏光コリニアホログラフィー」と呼んでいた。その後、参照光と情報光を空間的に分離する、本論文で述べる方式まで研究開発が発展した。たった一つの対物レンズでホログラムの記録再生を可能にする技術を、広義の意味で「コリニアホログラフィー」、あるいは、単純に「コリニア方式」と呼ぶことにした。しかし、研究開発初期の時点では、角度を持たずに同じ方向へ進む参照光と情報光が、レンズで絞られるだけで、本当に記録媒体中に体積的なホログラム（干渉縞）を形成させられるのかなど、懐疑的な意見も多かった。

この章では、まず、ホログラフィック光メモリーの基礎技術について概説する。その上で、従来の

方式に比較して、コリニア方式によるホログラムの記録再生方法を述べるとともに、実際にホログラムの記録再生ができることを実験により実証した結果を示す。次に、ホログラフィック光メモリーを実現するための基本光学系の構成とページデータの基本フォーマットについて述べる。また、コリニア方式によって形成される干渉縞を、シミュレーション手法を用いて可視化して示した結果について述べる。更に、コリニア方式において厚みを持った体積的な記録材料へ有効に干渉縞を形成する技術についても言及する。

2.2 ホログラフィック光メモリーの基礎技術

2.2.1 ホログラム記録媒体

ホログラフィーは波面の記録再生技術であり、干渉をしている光の波面（光の振幅と位相の分布）を屈折率分布として記録材料内に形成し、その後に記録のときと同じ光の一部分を照射することで、もとの光を再現する技術である。光の振幅と位相の分布を屈折率分布として記録する方法は、記録材料の種類によって異なるが、ここではフォトポリマーを用いた場合について説明する。ホログラフィー用フォトポリマー記録材料への干渉縞形成メカニズムは、概ね図6のようにになっている。ホログラムの記録を目的としたフォトポリマーの組成は、干渉縞記録のためのモノマー、記録材料の形状を維持するためのマトリックス、場合によっては更に非反応性成分や各種添加剤によって形成されている。光照射前、モノマーや非反応成分はマトリックス中で均一に分散している。光照射による露光すなわち記録により、光重合反応が開始する。反応の進行とともにモノマーは生成ポリマーに取り込まれるとともに非反応成分が拡散し、重合部と非重合部との間で屈折率変調が進み干渉縞が形成されていく、と考えられている。

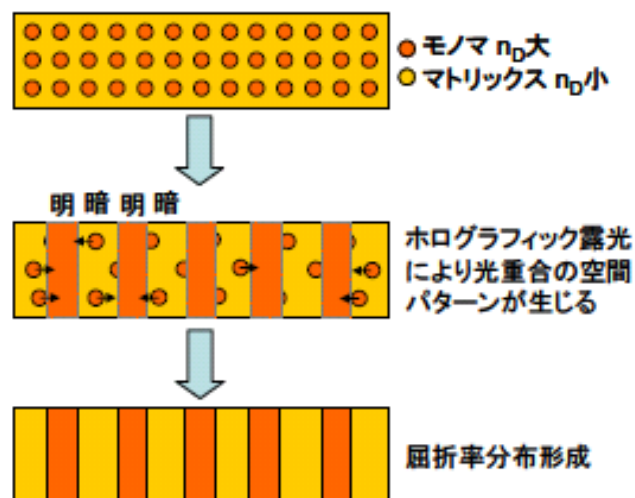


図6 フォトポリマー記録材料への位相変調干渉縞の形成メカニズム

ホログラフィー用フォトポリマー記録材料の代表的な構成成分と特徴、および、記録材料に求められる主な要求内容を以下に概説する。

（１）マトリックス

マトリックスは記録材料の形状を維持するための成分であり、高い光線透過率や透明性、或いは屈折率変調を促進するためにモノマーに比して低屈折率であることなどが求められる。一般にウレタン樹脂やエポキシ樹脂が使われている。

（２）モノマー

モノマーは干渉縞を記録するための成分であり、高い光線透過率や透明性、マトリックスに比べ高屈折率であることが求められている。光硬化により干渉縞を記録することから、記録システムとしては光カチオン重合系と光ラジカル重合系がある。光カチオン重合系ではシリコン系エポキシ²⁾など脂環式エポキシ化合物が、また、光ラジカル重合系ではビニルカルバゾール、スチレン誘導体、アクリレートやそれらのプレポリマーなどビニル化合物が用いられており、低収縮を図りながらダイナミックレンジの向上、高屈折率、高反応性（高感度）、透明性の付与も図っている[5-7]。

（３）非反応性成分

非反応性成分は記録時に拡散速度を増大させ、屈折率変調を容易にするために用いられている。この成分はマトリックス同様出来るだけモノマーより低い屈折率であることが望まれる。一般にセバチン酸ジブチルなどの高沸点可塑剤[8]や、芳香族シリコン[5]などが用いられているが、干渉縞の経時的な拡散など問題も多く、添加には細心の注意が必要である。

（４）光重合開始剤

記録再生に用いられるレーザー光源としてはブルーあるいはグリーンレーザーが用いられており、光重合開始剤も光源に適したものを選定する必要がある。また、光硬化システムにより光ラジカル重合開始剤と光カチオン重合開始剤がある。ブルー光源の場合、光ラジカル重合系ではビスアシルホスフィンオキシサイド（ビス（2,4,6-トリメチルベンゾイル）-フェニルホスフィンオキシサイド）など一般的な紫外線硬化用光ラジカル開始剤が用いられている。一方、グリーン光源の場合、開始効率の点からチタノセン系化合物を単独で、また、ベンゾフェノン系化合物と増感色素を組み合わせる場合が多い。光カチオン重合系では感光性オニウム塩と増感色素を組み合わせる場合が多い。いずれの場合も増感色素の添加によりベースノイズレベルの上昇や経時安定性の低下が懸念されることから添加には細心の注意が必要である。

（５）低収縮

ホログラフィック光メモリーは精密な干渉縞形成が必要であるが、記録時または記録後に大きな収縮が発生すると干渉縞が歪み、再生が不能となる。最近の記録材料はほとんどのものが0.1%以下である。

（６）高感度

ホログラフィック光メモリでは、情報の転送レートも高速化する必要がある。光源がパルスレーザーの場合、1パルスで、しかも出来るだけ低い光エネルギーで記録させることが必要である。また、半導体レーザーを用いる場合には、より低出力であることから感度の高い記録材料が望まれる。

(7) 高ダイナミックレンジ

記録容量を向上させるには、多重記録数を増大させる必要がある。その性能指標がダイナミックレンジと呼ばれており、少しでも高いダイナミックレンジが必要である。ダイナミックレンジの指標としては、式(1)のように $M/\#$ (エムナンバー) が使われる。ここで、

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

で求められ、 η_i は i ページ目の回折効率である。通常、記録材料厚を 1.0mm としたときの値を使う。

(8) 低クロストークノイズ

ホログラフィック光メモリの高密度化は多重記録によって実現される。多重記録の方法はさまざまな方法が提案されているが、多重記録を行って読み出しを行なった際、隣接ホログラムの再生信号が消失して、クロストークノイズが十分に小さいことが必要である。

(9) 低ベースノイズ

記録容量を向上させるには出来るだけ小さい回折効率で記録する必要がある。そのためには、ベースノイズが低く、多重記録した際でも十分な信号対ノイズ比 (SNR) を確保できることが必要である。

(10) 使用温度領域の拡大

記録した干渉縞が温度変化によって伸縮した場合、再生出来なくなる可能性が有る。そのため、記録材料には出来るだけ線膨張係数の低い、つまりは屈折率の温度変化の出来るだけ小さい成分を選択する必要がある。

2.2.2 多重記録再生技術

ホログラフィック光メモリは、別名、体積的ホログラムメモリとも呼ばれ、厚みを持った体積的な記録材料にページデータを次々に3次元的に記録して蓄積していくことで、結果的に記録密度を増大させている。多数のページデータが記録された材料内の干渉縞の構造は、記録したそれぞれのページに対応する情報が空間的に独立した領域に存在しているわけではなく、記録材料内に混ざり合っ (多重化されて) 形成されている。体積的ホログラムメモリでは、このように記録材料内に複数枚のページデータを多重記録し、混ざり合った干渉縞から任意のページデータを低クロストークで読み出す方法として、Bragg 回折を利用した多重記録再生技術が用いられている。そのため、多重して記録する際には、それぞれのページデータの Bragg 条件を十分離して記録する必要があり、ページデータの再生の際には、Bragg 条件を満たすように高精度な調整が必要になる。

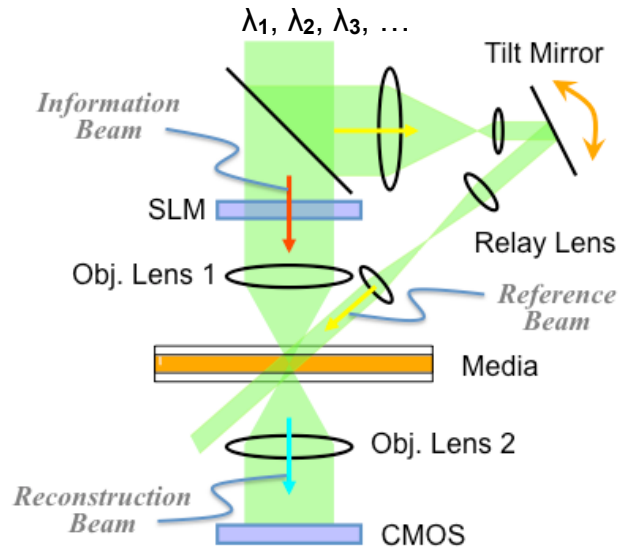


図 7 角度多重方式 および 波長多重方式 の 記録再生光学系配置（二光束干渉法）

図 7 に示す二光束干渉法の記録再生光学系の配置を用いて、角度多重方式、および、波長多重方式を用いる場合を例にとって説明する。Bragg 回折による再生像の強度の変化を、参照光の記録時と読み出し時の角度差や波長差をパラメータとして変化させてプロットすると、図 8 のようになる[2]。

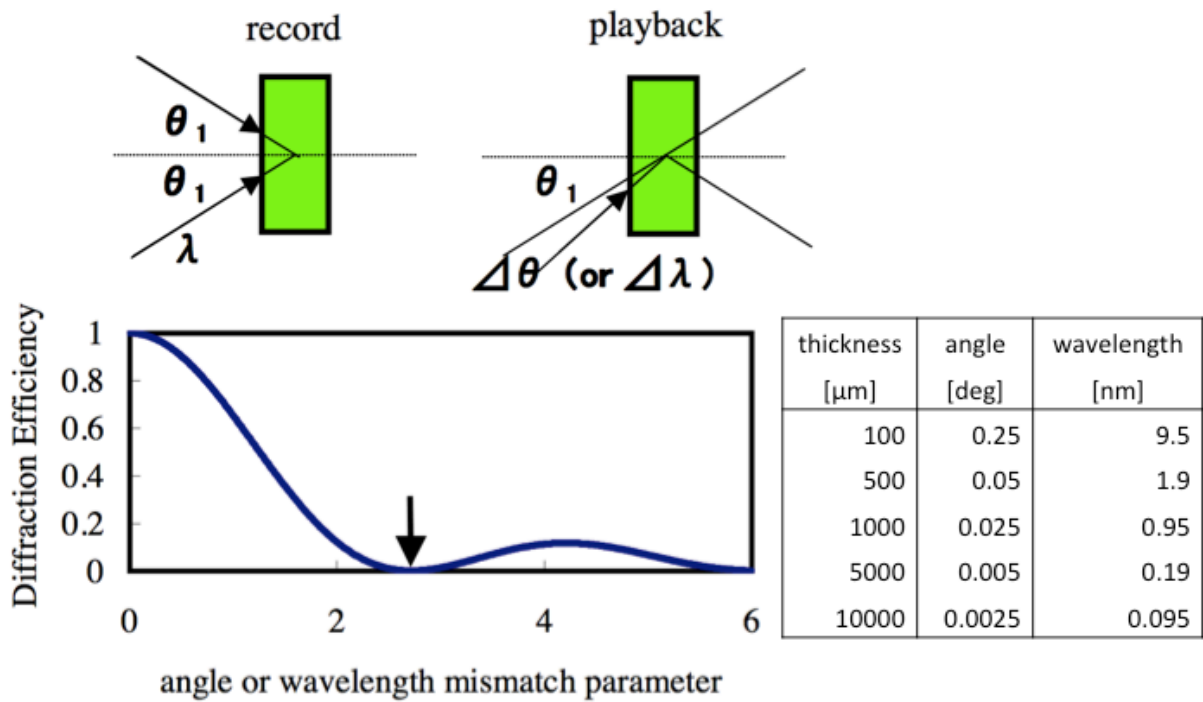


図 8 Bragg 回折による再生像の強度変化：記録時と読み出し時の参照光の角度差と波長差

このグラフは、参照光の角度や波長といった条件が、記録時と読み出し時に全く同じであれば、再生像の強度(回折効率)は最大になり、再生時の角度や波長が変化していった場合には、回折効率が減少し、最終的にはゼロになる点が現れる(図の矢印)事を示している。

この回折効率が最初にゼロになる点を、**first null point** と呼ぶ。大きい回折を発生させるのに必要となる角度合わせや波長合わせなどの程度を「選択性：selectivity」と呼び、パラメータとなる物理量によって「角度選択性」、「波長選択性」、「シフト選択性（後述）」と呼び分けている。特に、**Bragg** 条件が直接的に効いてくる上述のような場合には、**Bragg** 選択性とも呼んでいる。

また、参照光の角度変化や波長変化にたいする選択性は、記録材料の厚さがパラメータとして関係してくる。図 8 の右に示されているテーブルには、記録材料の厚さに対する **first null point** の現れる角度差、波長差の値が示されている。このように、記録材料の厚みが厚いほど、**first null point** の現れる角度差、波長差が小さく、**Bragg** 条件は厳しくなってくる。例えば、記録媒体の厚さが $500\mu\text{m}$ のときは **first null point** までの角度差は 0.05° 程度、波長差の場合は 1.9nm 程度であるのに対し、厚さが 10 倍の $5000\mu\text{m}$ になると、角度差は 0.005° 、波長差は 0.19nm となる。

記録密度を向上させるためには、最初に記録したホログラムが **first null point** あるいは次の **second null point** などになるようにパラメータを変更したあとに、次のデータを重ねて記録すると、最初のデータからの再生像が次のデータに混ざらずに再生する事ができる。これは同様に、最初のデータを再生しようとした時に次に記録されたデータが混ざらずに再生されることも意味しており、ページ間のクロストークを最小にした多重記録が行なわれる事を意味している。

以上のように、体積的なホログラムメモリーでは選択性を利用して多重が行なわれるため、ホログラム記録材料が厚く、**Bragg** 条件への調整が厳しいほど、多くの多重ができる事となり、記録密度を著しく向上する事が可能になるというメリットがある。しかし一方では、僅かなズレによって所望のページデータが読み出せなくなってしまうという危険性も有していることになる。このような状況は、データストレージシステムとしては致命的な問題に繋がるため、実際のシステムの設計の際には、データ再生の再現性を確保するための何らかの方策が講じられなければならない。

ホログラフィック光メモリーのもう一つの多重方式として、参照光に球面波を用いて、記録材料自体の位置をずらすことでパラメータを変更して多重記録再生を行なう、シフト多重方式も興味深い方式である。シフト多重方式は、1995 年に D.Psaltis らの論文[10]によって報告された。その代表的な光学系の構成を図 9 に示す。図示したように、記録メディアにはディスク形状のものがよく用いられている[9-12]。以下で、シフト多重方式の動作原理について説明する。角度多重方式や波長多重方式では参照光は一般的に平面波であるが、シフト多重方式では球面波の参照光を用いるため、記録材料の

一点に着目したとき、メディアがシフトすることで照射される参照光の波面方向が変化していくことになる。この現象を利用して、メディアをシフトすることで、参照光の実質的な入射角度を変えて、空間的にオーバーラップのある領域に別の記録を多重するのがシフト多重方式である。

以上の多重方式に共通するが、実用化に際しての問題点は、記録媒体に基準が無いことである。そのため、ホログラム記録媒体を取り外した後に再び装着した際に、記録した場所に正確にアクセスして所望のデータに対応したパラメータの光ビームを一発で照射する事が難しい。また、シフト多重方式では、ディスクの回転により面ぶれや偏心（論文では、ウォブリング“wobble”と呼んでいる）が起こって、光軸方向や面内方向に再生位置がズレることで、再生信号が劣化してしまうことなどが挙げられる[13]。この他にも、光学系の配置が非対称であるため、シフト方向によっては十分なシフト選択性が得られないことも、問題点として残されている。

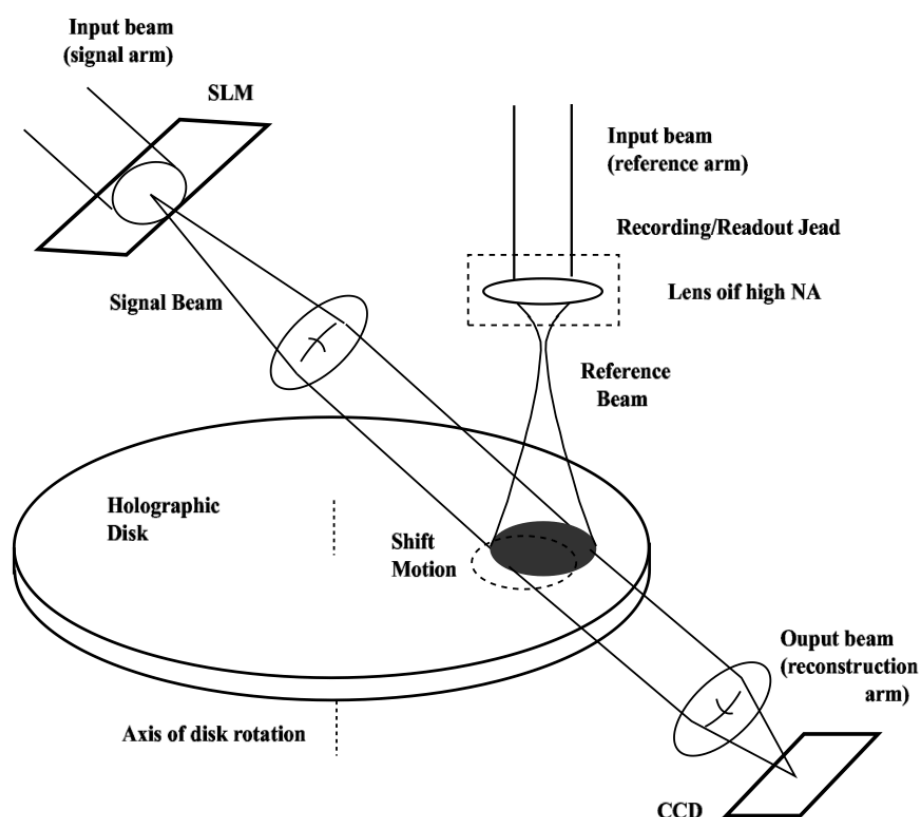


図 9 シフト多重記録再生方式における光学系の構成例

2.3 コリニアホログラフィーによる記録再生方法と原理実証

一般的なホログラフィーではそれほど深刻ではないが、特にホログラフィック光メモリーの実現を目的とした場合には、再生のための参照光と再生された情報光をいかにして分離するかが重要な技術課題である。コリニアホログラフィーでは、空間的な分離方法を採用した。以下で、コリニア方式による情報の記録再生方法を説明する。

まず記録方法について説明する。図10に示すように、同一の空間光変調器（SLM: Spatial Light Modulator）上に、情報光パターンと、それを取り囲むように円環状の参照光パターンも、同時に表示させる。このSLMに対して、図11に示すようにレーザー光を照射させると、情報光パターンと参照光パターンの光は同軸状の一本の光ビームとなって進み、対物レンズで集光される。その結果、情報光と参照光は記録媒体上で自動的に混ぜ合わされ、ホログラム（干渉縞）が形成される。

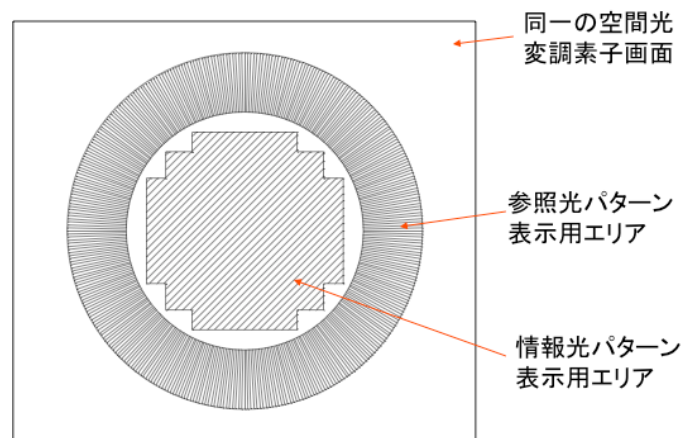


図 10 コリニアホログラフィーにおける空間光変調器への情報光と参照光の同時表示

次に再生方法について説明する。再生時には、図12に示すように参照光パターンのみをSLMに表示する。これにレーザー光を照射させると、参照光パターンの光はドーナツ状の光ビームとなって進み、対物レンズにより記録されたホログラムに照射される。そうすると、再生用の参照光パターンの中心の空白部分に情報光パターンが再生される。ホログラフィック光メモリーとして利用する場合には、記録媒体に反射膜を設ける。そうすると、再生像は対物レンズに再び戻されるため、ビームスプリッターで反射するなどしてCMOSセンサーにより再生像を検出することができる。CMOSセンサー上では、情報光パターンとともに参照光パターンも結像されるが、アパーチャーで遮蔽したり、あるいは情報光のみを電気的に検出したりすれば良いため、情報光と参照光は空間的に分離される。これがコリニアホログラフィーの記録再生原理である。

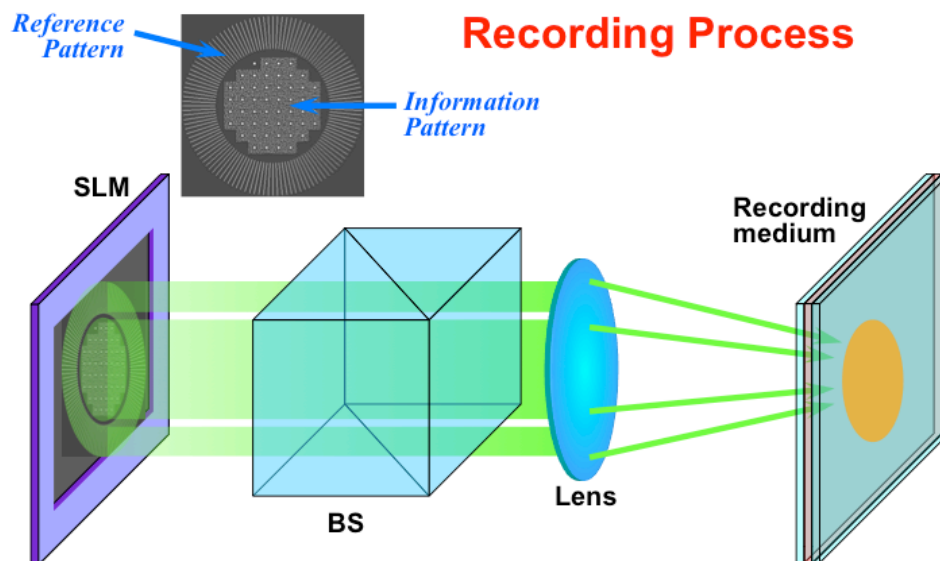


図 11 コリニアホログラフィーによる画像の記録方法

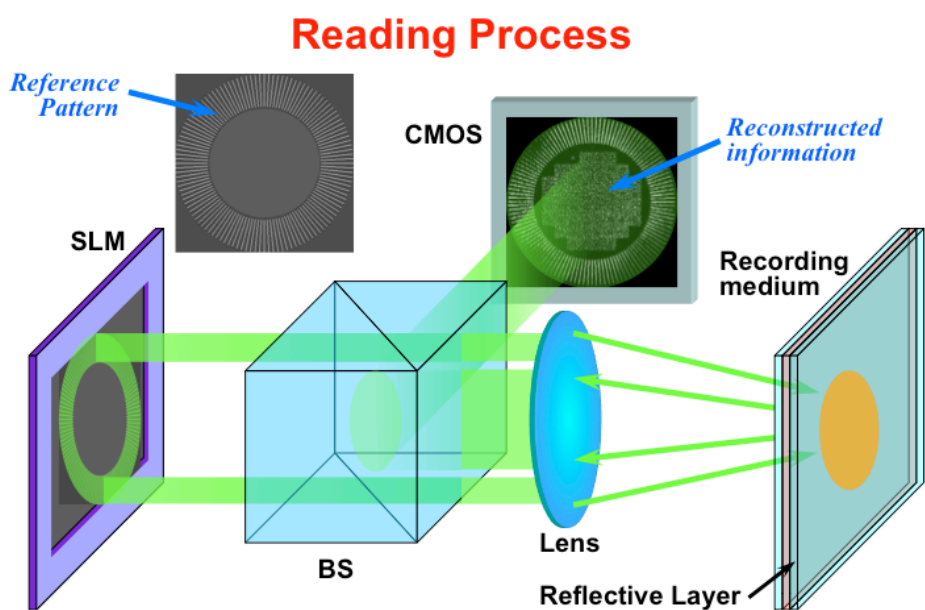


図 12 コリニアホログラフィーによる再生方法

この記録再生原理に基づき、実際にホログラムの記録再生を試みた。その実験結果を図 13 に示す。図の左は、SLM に表示される情報光パターンと参照光パターンを模式的に示しており、黒色のピクセルが ON ピクセルとなり発光する。右が、記録再生されて CMOS センサーで検出された情報光パターンの再生画像である。参照光部分は、CMOS センサーの手前に配置したアパーチャーで除去した。再生像の中心部分に若干のノイズが観測されるものの、ページ全体に均一な輝度の再生像が得られた。

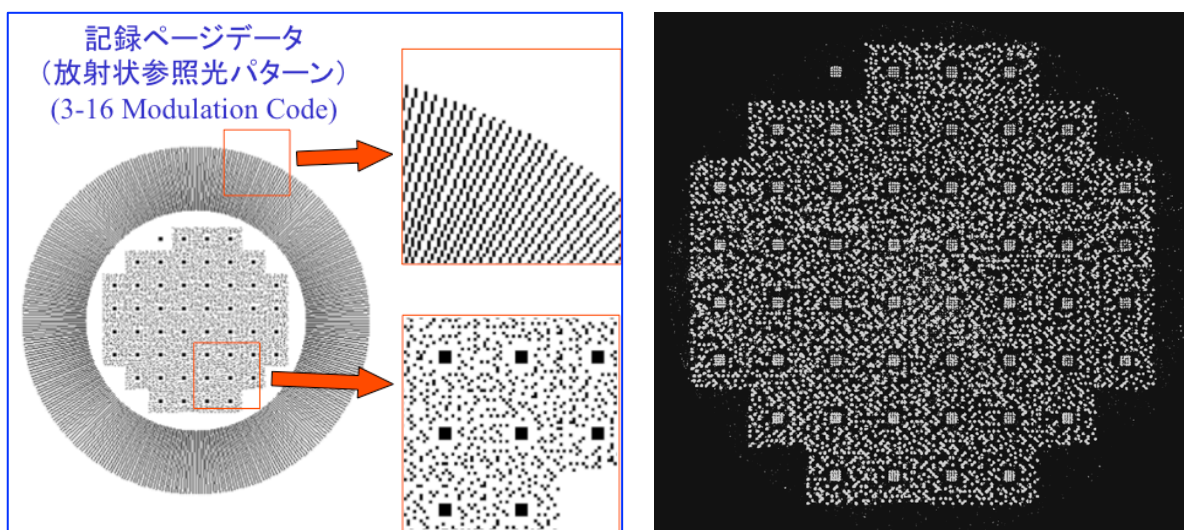


図 13 コリニア方式の原理に基づいて記録再生された情報パターン（右：原理実証）

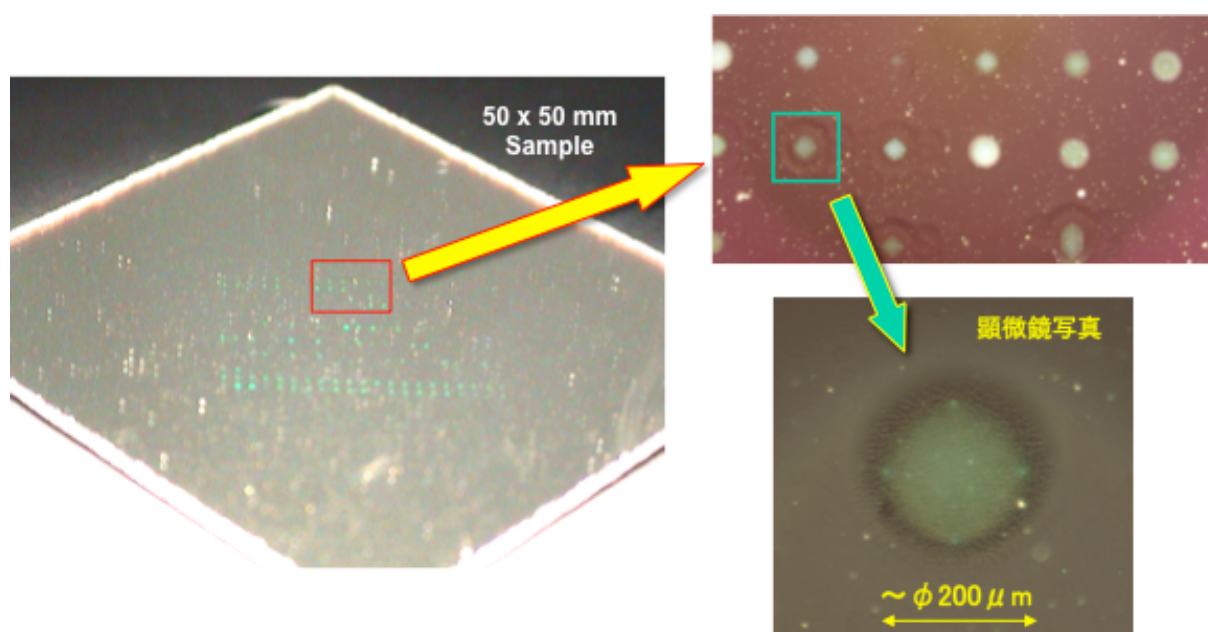


図 14 反射膜付き記録メディアと記録されたホログラムの顕微鏡写真

図 1 4 は、記録再生実験後の記録メディア（反射膜付き）の外観写真である。照明方法などを工夫することで、条件を変えて記録した幾つものホログラムが緑色となって確認できる。このうちの一つを顕微鏡観察したところ、ホログラムのサイズは直径 $200 \mu m$ 程度となっているのが確認された。

以上の結果から、角度を持たずに同じ方向へ同軸状の一本の光で進む参照光パターンと情報光パタ

ーンが、レンズで絞られるだけで記録媒体中にホログラム（干渉縞）を記録し、同じ参照光パターンの照射により情報光パターンを再生することが可能であることが、世界で初めて、実験により基礎原理実証された。

2.4 コリニア方式による光メモリー実用化の基本技術

2.4.1 基本コンセプトの検討

次世代のホログラフィック光メモリーを実用化レベルで実現するためには、まず、世に送り出されて成功している光メモリーと比較対照することで、実用化を阻んでいる項目を浮き上がらせることができる考えた。そのため、日本が世界に先駆けてリードして来た光ディスク・データストレージと比較して、ホログラフィック光メモリーが抱える問題点とクリアすべき技術課題を考察した結果、以下のような点が浮かび上がってきた。

- (1) 参照光を再生時に分離するため考案された2光束干渉法が、光学系を複雑かつ大型化してしまっている。光ディスクのような、たった1つ対物レンズを用いて記録再生が行えるシンプルなホログラフィック光学系の創造が必要である。
- (2) 微小な参照光の角度の変化や、記録位置の微小なシフトを利用して多重記録を行い高密度化の実現を目指しているが、記録媒体を装置へ再度セットした際の精度の再現性が保てず、逆にリムーバビリティ（可換性）に問題を生じている。記録媒体自体に高精度な基準を持たせ、これを基にした高精度な記録再生を実現する手法の考案が必要である。
- (3) 同じ種類の記録装置と記録媒体であっても、ある装置で記録したものを他の装置で再生するというような、装置間のインターチェンジャビリティ（互換性）が確保されていない。装置間のばらつきや記録媒体間のばらつきを吸収する広いシステムマージンを確保するとともに、共通の、標準化された物理アドレスや基準を持った記録媒体と記録再生システムの構築が必要である。
- (4) 特にホログラムの記録の際には極端に振動を嫌うが、装置を堅牢に作ったとしてもディスク状の記録媒体は剛性が低いため、メディアのばたつき等により大きな振動が発生する。これは除振台で除去することもできない。従って、記録媒体の動きにダイナミックに追従する光サーボなどの応用が必須である。
- (5) ホログラムの記録再生では、これまではコヒーレンシーが高く高品質なシングルモードのレーザー光源が使われてきた。しかし、ドライブとメディアのコストを下げて製品化するためには、究極的には、半導体レーザーの利用を視野に入れる必要がある。そのため、コヒーレンシーの低いレーザー光源での記録再生が実現できる、広い波長マージンをもった記録再生手法を確立する必要がある。

上記の考察を基に、具体的な個々の実現化技術はひとまず無視しておいて、次世代のホログラフィ

ック光メモリーのあるべき理想のカタチを思い描いた。その結果、図15に示す基本コンセプトが出来上がった。

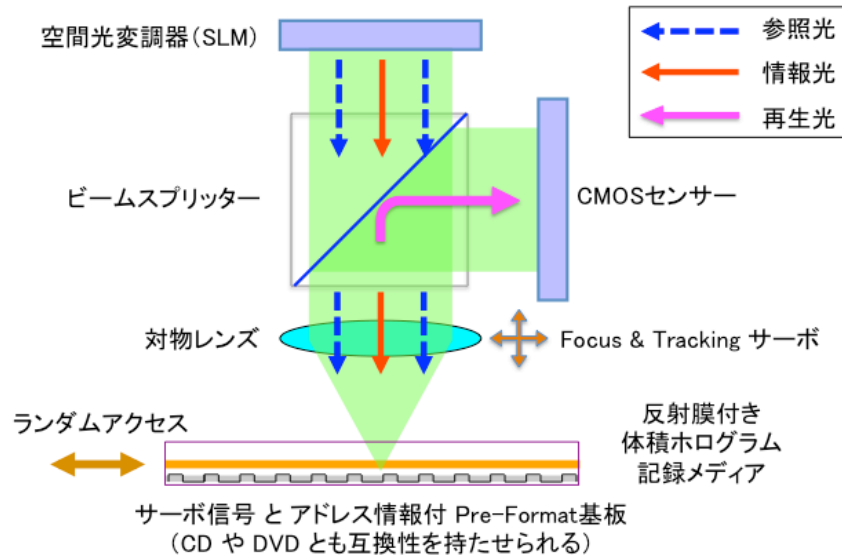


図 15 コリニアホログラフィーによるホログラフィック光メモリーの基本コンセプト

最も大きな特徴としては、コリニア方式の基本である、たった一つの対物レンズを用いてホログラムの記録再生を行なう点である。これにより、光学系がシンプルとなり、かつ、記録媒体の片面のみに光学ヘッドの配置が可能となるため、システム全体がコンパクトに設計できる可能性がある。また、参照光と情報光が同一の光路を辿るコモンパスとなっており、参照光と情報光の光路差が最小となる。このため、コヒーレンシーの低い半導体レーザー光源や Q-スイッチレーザーでも、ホログラムの記録再生が実現できると考えた。

記録媒体には反射膜がコーティングされており、これにより再生される情報光が記録と同じ対物レンズを通して位相共役的に再生される。基準となる反射面にはプリフォーマットされたアドレスも形成されている。これにより、光ディスクで培われてきた光サーボの応用が可能となり、記録媒体にナノメーターオーダーで光学系を追従させ、振動を抑制した記録再生が可能になる。また、記録媒体の可換性や互換性、所望のデータを瞬時に探し出すランダムアクセスも実現することが可能となる。更に、光学系の構成が記録メディアに対して垂直に配置され、かつ、シンメトリカルであるため、光学およびメカニカルなシステムマージンも、広く確保できる可能性がある。

2.4.2 コリニア基本光学系

図16に模式的に示すように、コリニア方式では対物レンズの入射瞳面にページデータのピクセルが配置されるのが基本である。そうすることで、各ピクセルは小さな開口と見なされ、点光源から発する球面波のように対物レンズに向かって進行する。対物レンズを透過後は、今度はピクセル毎に小さな平行光となり、対物レンズの焦点面に向かって集光していく。集光されて進む光はホログラム記録媒体へ入射するが、ホログラム記録媒体の反対側の端面で焦点となるように配置される。この記録媒体の反対側の端面には反射膜が設けられており、反射膜面に焦点が合うようフォーカスサーボがかけられ、対物レンズと記録媒体の相対位置が常に一定になるよう制御される。

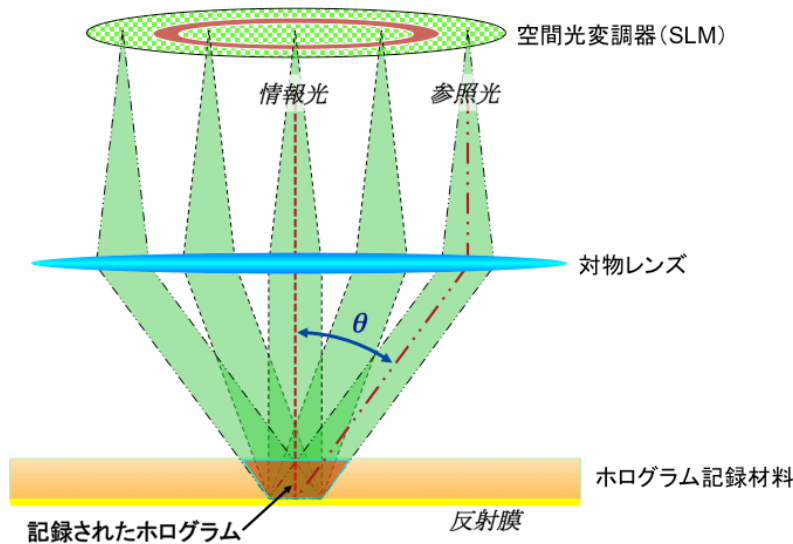


図 16 コリニア方式における 空間光変調器-対物レンズ-記録材料 の配置

理想的には、対物レンズの入射瞳面の位置に空間光変調器を配置できれば光学系は極めてコンパクトになるが、対物レンズの光学的な寸法上、そこに配置スペースを確保するのは難しい。また、仮にこのような配置が実現したとしても、情報光と参照光のフーリエ変換による高次の回折光が記録媒体中へ照射されるため、過剰な露光が行なわれるという問題もある。そのため、実際の記録再生光学系では、図17に示すように主光線が光軸と平行なテレセントリック光学系（いわゆる $4f$ 系）を用いて、空間光変調器の表示画像を入射瞳面に転送する光学系を構成した。また、テレセントリックリレーレンズ L1 と L2 の中心にアパーチャーを配置して高次の回折光をカットするとともに、ホログラムサイズを最小化してホログラムの消費を最小限にする工夫をした。なお、ここでは説明を簡便にするため、再生用の CMOS センサーを含めた戻り光の光学系と、焦点調整などのためのサーボ光学系は省略している。

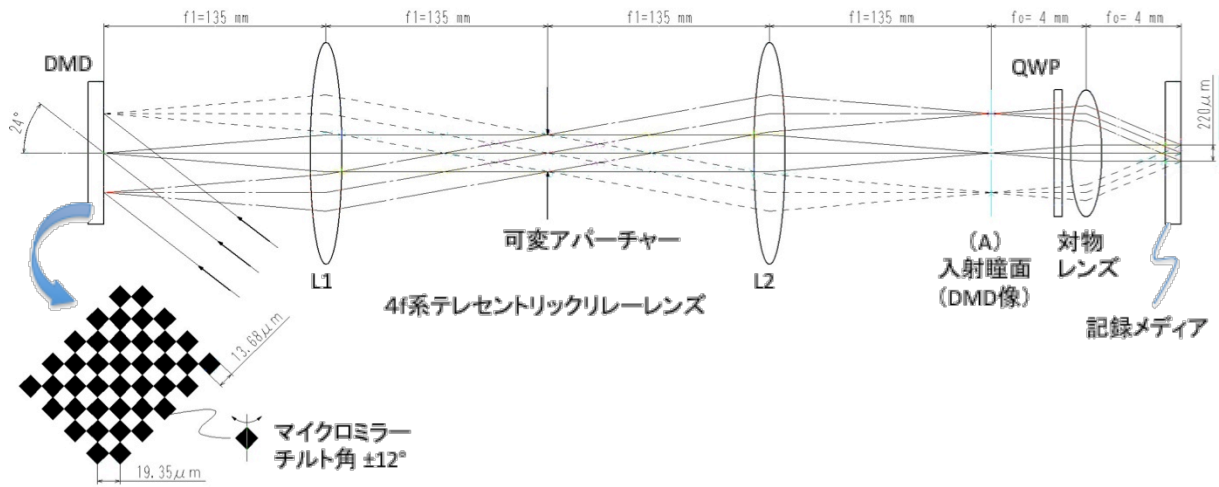


図 17 DMDを用いたコリニア方式基本光学系の構成例

記録再生用の空間光変調器としては、高速なフレームレートを実現するために Texas Instruments 社製の Digital Micro-mirror Device (DMD) を用いた。DMD に表示されたページデータは、テレセントリックリレーレンズ L1 と L2 により等倍サイズでリレーされて対物レンズの入射瞳面上 (A 位置) に再結像され、この再結像した DMD パターンが対物レンズによってフーリエ変換されながら、記録メディアへホログラム記録される。

以下で、実際のデバイスのパラメータを用いて、基本光学系の設計例を示す。使用した DMD のピクセルは、微小な正方形の MEMS ミラーで構成されており、±12度の2値に角度を変えることによりピクセルから反射される光の ON/OFF 動作が行われる。DMD のピクセル回転軸は対角線上となっているため、光学系のアライメントが難しく、光学系全体の光軸を同一平面内にシンプルに構成させるためには、この回転軸を垂直方向にすることが望ましい。そのため、DMD ユニット自体を面内に45度回転させた状態で設置することにした。このようにして配置された DMD へレーザー光を24度の方向から入射すると、ON ピクセルで反射された光線は、DMD デバイスから垂直方向（対物レンズに向かう光学系の光軸方向）へ出射される。

このようにして生成された DMD からの光線を、焦点距離 135mm のカメラレンズ L1 と L2 で構成されたテレセントリックリレーレンズへ入射するが、リレーレンズの焦点位置に可変虹彩絞りが配置されている。虹彩絞りの直径は、DMD を1ピクセルごと千鳥状 (Chess Board Pattern) に ON/OFF 変調した場合の最高空間周波数から設定する。1辺の大きさ 13.68μm の DMD ピクセルを回折格子と見なすと、最小格子ピッチ d は 45度傾けた場合 19.35μm となる。記録再生用のレーザー波長 λ = 532nm の光がこの回折格子で回折される時、最低次である ±1 次光の回折角度（半画角）は、

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{0.532}{19.35} \right) = 1.575 \text{ (度)} \quad (2)$$

となる。

従って、最低限この半画角が通過すれば、DMD の ON（白）と OFF（黒）を判別することが可能となる。実際の光学系では、記録再生されたページデータの品質を評価しながら決定される。図 1 7 に示したコリニア方式基本光学系では、対物レンズの焦点距離 $f_{obj} = 4 \text{ mm}$ であるため、半画角を約 1.6 度とした場合の最小のホログラムサイズは、対物レンズの焦点面で、

$$2f_{obj} \tan(\theta) = 220 \mu\text{m} \quad (3)$$

と算出される。

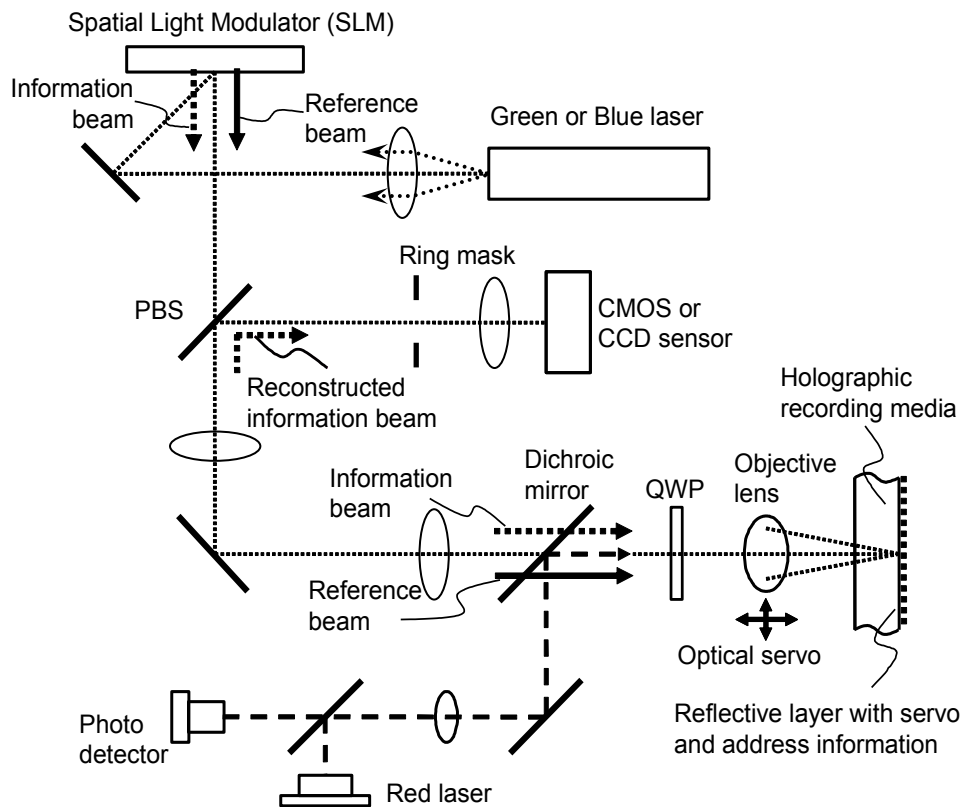


図 18 コリニア方式によるホログラフィック光メモリの光学系全体構成

図 1 8 に、再生用の CMOS センサーや焦点調整などのためのサーボ光学系も含めた、コリニア方式によるホログラフィック光メモリの光学系全体構成を模式的に示す。DMD の直近の光路上には偏光ビームスプリッタ（PBS）が配置されており、対物レンズの手前に配置された $1/4$ 波長板（QWP）との組合せで、記録媒体から戻ってくる再生光はページデータ読み取り用の CMOS センサーへ導びかれる。円環状の参照光パターンは Ring Mask によりカットされ、情報光パターンのみ CMOS センサーへ入射される。手前に配置されたレンズで DMD の 1 画素を CMOS センサーの $3 \times 3 = 9 \text{ pixel}$ （3 倍のオーバーサンプリング）で検出されるように倍率が微調整されている。対物レンズの前にはダイクロイックビームスプリッタが配置されており、光サーボ用の赤色レーザー光を記録再生光と同軸に

対物レンズへ導く構成となっている。実験に用いる記録メディアは、図示しないが厚み $600\mu\text{m}$ の透明ガラス基板と、表面に Al の反射膜がコーティングされたガラス基板との間に、記録材料であるフォトポリマーをサンドイッチした断面構造となっている。透明基板とフォトポリマーを含めると、Al 反射膜までの厚みは $1.1\text{mm}\sim 1.2\text{mm}$ となる。そのため、対物レンズに備わっている球面収差補正環を利用して板厚の補正を行なっている。焦点位置の制御は、光ディスクで用いられている非点収差法によるフォーカスサーボ機構により、Al 反射膜にページデータのフーリエ変換面が来るようにオートフォーカス制御をしている。ここで、記録には 532nm のレーザーを用いるが、サーボ用としては記録材料（フォトポリマー）に感光性の無い 650nm の半導体レーザーを組み合わせ実現している点に特徴がある。

既に図 1 3 で示した、コリニア方式による記録再生の基礎原理実証実験は、この図 1 8 の光学系構成で行なわれた。その際の条件および諸元は以下のとおりである。

ホログラム記録材料： フォトポリマー

記録材料の厚み： $500\mu\text{m}$

装置組込み緑色 LED による Pre-Exposure： 150sec

ホログラム記録再生波長： 532nm

記録パワー：平均 $3.5\text{mW}@20\text{kHz}$, $10\text{nsec pulse}\times 20\text{pulse}=3.5\mu\text{J}$

記録終了から 60 秒後に再生

再生パワー：記録と同様 平均 $3.5\text{mW}@20\text{kHz pulse}\times 20\text{pulse}=3.5\mu\text{J}$

CMOS センサー (Photron)：検出ゲイン 6 dB

情報光と参照光の光量比：ピクセル密度にて約 2 倍

2.4.3 ページデータの基本フォーマット

既に述べたように、二次元ページデータは、円環状の参照光パターンとその円環の中に表示される情報光パターンから構成されている。図 1 9 に具体的なページデータのパターン例を示す。なお、この図では、記録に使われるべき ON ピクセルが黒で、その他の OFF ピクセルが白で示されている。同図(a)は記録時に SLM 上に表示されるパターンで、参照光パターンと情報光パターンが同時に表示される。同図(b)は再生時に SLM 上に表示されるパターンで、記録時と同じ円環状の参照光パターンのみの表示となる。放射状の線に見える参照光も、拡大すればピクセル単位のパターンである。コリニア方式によるホログラム記録再生を高品質に実現する鍵は、この参照光パターンと情報光パターンの設計にかかっていると言っても過言ではない。

初めに情報光パターンの表示ルール、すなわちデータページフォーマットについて説明する。ユーザーデータは予めデジタル化され、必要に応じてエラー訂正符号の付加やランダム配列化などの前処

理を施した後、所定のルールに従って 8 bit 単位でコーディングされ、順次、二次元ページ上に配置されてデータページフォーマットとなる。図 20 に、ページフォーマットとコーディングの一例を示す。

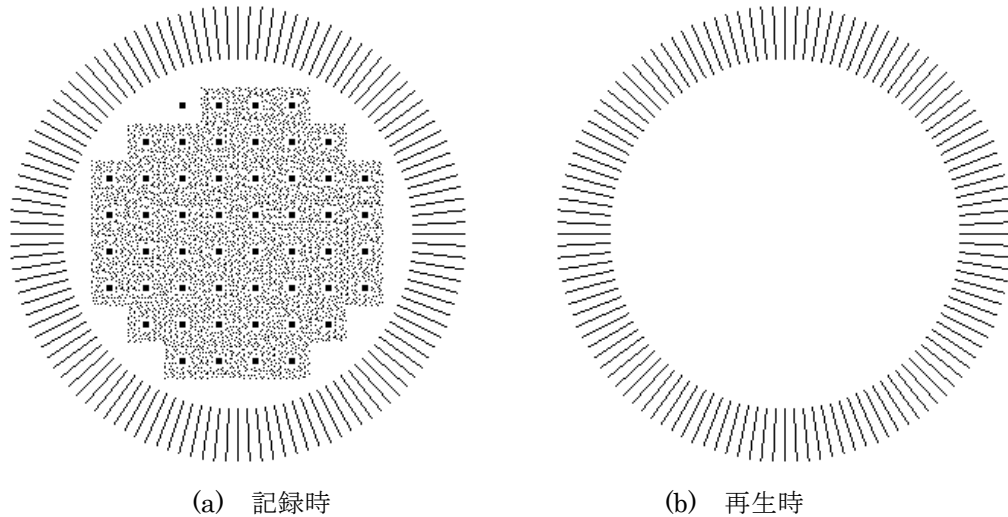


図 19 コリニア方式ホログラフィックメモリーの二次元ページデータ例

データページ（あるいは単純にページとも呼ぶ）は、左上にある一つのページシンクマーク（Page Sync Mark）と 51 個のサブページ（Sub-Page）で構成され、各サブページには真ん中にシンクマークがあり、一つのサブページあたり 32 個のシンボル（Symbol）を含んでいる。シンボルは 16 画素（Pixel）で構成されており、 $16 \text{ Pixel} = 1 \text{ Symbol} = 1 \text{ Byte} = 8 \text{ bit}$ の Sparse Modulation Coding の一種であり [9]、ここでは 3 : 16 変調（3:16 Modulation Coding）と呼ぶことにする。このコーディングは、必ず 3 ピクセルのみ ON 表示され、残りのピクセルは OFF で表示されないルールとなっている。3:16 Modulation Coding は、常に 16 ピクセルのうち 3 ピクセルしか表示しない。このため記録時のデータページ当たりの光量を一定に保つことができるほか、再生時にはシンボルパターンの中で明るい順番に 3 つのピクセルを同定すればデコードできるため、再生データページの輝度ムラに強いという特徴がある。また、ピクセル同士は隣接しないような配置を選びフーリエ変換時の DC 成分を抑制している。このルールに則って、 $8 \text{ bit} = 256$ 通りのシンボルパターンが作られ、1 対 1 に対応したルックアップテーブル（LUT: Look Up Table）が作成される。ユーザーデータの符号化と復号化はこの LUT に基づいて行われる。コーディングの効率は $\text{Code Rate} = 8 \text{ bit} \div 16 \text{ Pixel} = 0.5$ である。このデータページあたりの情報量は、 $51 \text{ Sub-Page} \times 32 \text{ Symbol} \times 1 \text{ Byte} = 1.632 \text{ kByte}$ となっている。データページの中には、エラー訂正符号も組込まれるが、再生信号の品質やシステムの許容エラー量と処理能力などにより決定される。また、このデータページはほんの一例であり、最終的にはより最適化された設計が行なわれると考えている。

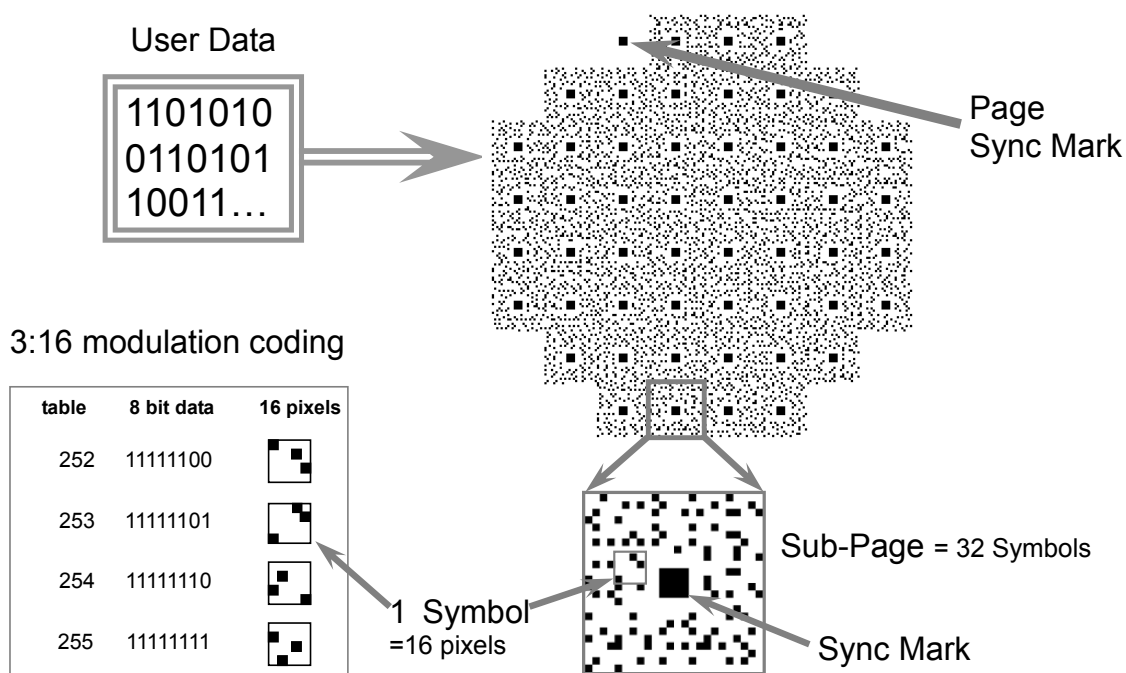


図 20 3-16 コーディングとデータページフォーマットの説明図

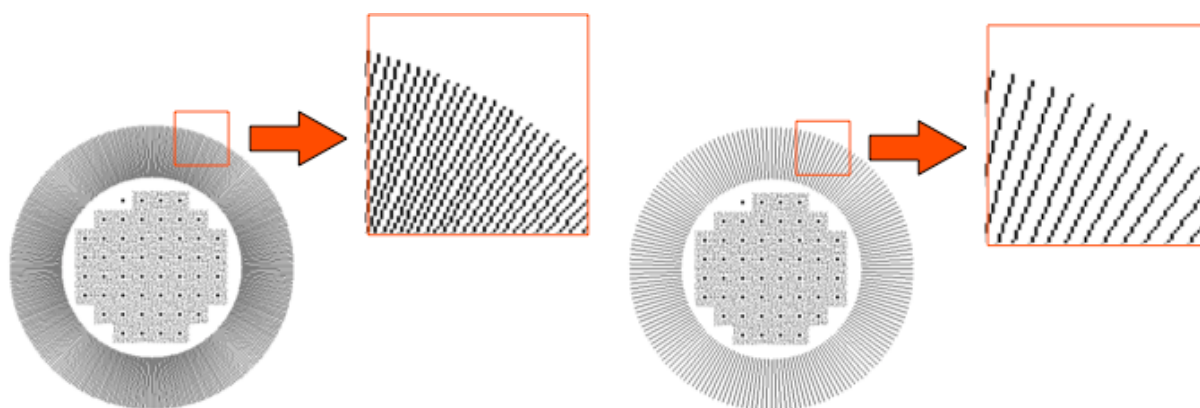


図 21 コリニア方式における参照光と物体光の光量比率の調整方法

次に参照光パターンについて説明する。コリニア方式では、参照光もピクセル単位で規定されている。空間光変調器（SLM）上に表示されるページパターンでは、参照光パターンと情報光パターンはピクセルレベルで位置関係が一義的に規定されている。更に、記録媒体へ付加された反射膜へフォーカスサーボにより対物レンズの焦点を合わせられ、アドレス情報とトラッキングサーボにより、対物レンズの焦点位置と記録媒体の位置合わせも高精度で可能なため、異なる装置間での記録媒体のインターチェンジャビリティ（交換性）を確保する際に大きなメリットとなる。また、ホログラム記録においては、参照光と情報光の光量比率の制御も重要なパラメータである。コリニア方式においては、

図2-1に示すように、表示する参照光のピクセル数を変える事で、ロバストでかつ簡便に光量比率を規定する事が可能となっている。

2.5 コリニア方式による体積的な干渉縞の形成

2.5.1 コリニア方式で形成される干渉縞のシミュレーション

研究開発の初期段階では、コリニア方式によってどのような干渉縞が形成されるのかは定量的に説明できなかった。しかし幾何光学的に考えても、参照光と情報光が同軸で進行したあとに対物レンズで集光されたあとに発散すれば、少なくとも焦点近傍においてはお互いが交差し合い、干渉し合うはずと考えた。そこで、この焦点付近における光線の交差状態を、シミュレーションにより可視化できないものかと考えた。

種々の方法を試みたが、最終的に、コリニア方式では参照光と情報光が2次元画像として同軸で進行することから、DMD から離れるにつれて回折パターンとして観測されることに着目した。つまり、所望の距離だけ離れた位置での2次元画像の2次元的な回折パターンを数値計算できれば、得られる結果は平面情報ではあるが、記録媒体中の任意の位置での振幅と位相パターンを求められると考えた。そして、記録媒体中における異なる位置での平面の振幅と位相パターンを多数求めれば、最終的に、厚みを持った記録媒体中に形成されるであろう干渉縞（体積ホログラム）を可視化することができるはずである。以下で、可視化のアプローチ方法と実際のシミュレーション結果を示す。

DMD で表示されるピクセルを四角い微小な開口とし、ページデータと同じ微小な開口群のパターンを持ったマスク画像を想定する。これを背面から均一な位相と強度の平面波で照射し、マスクからの距離を変化させたときに得られる波面を数値計算する。まず、このマスク画像を対物レンズの入射瞳面に配置し、レンズの主平面までフランフォーファー回折したときの位相と振幅の2次元パターンを数値計算により求める。次に、この2次元（振幅、位相）パターンが対物レンズで球面波として集光されながら回折するとして、焦点には達していない任意の平面位置での振幅と位相の2次元パターンを求める。次にこの距離を、例えば $1\ \mu\text{m}$ だけ光軸方向へ進行した平面位置で、再度、振幅と位相の2次元パターンを求め、更にまた $1\ \mu\text{m}$ だけ光軸方向へ進行した平面位置で求める、という数値計算プロセスを繰り返す。この操作は、対物レンズで集光されていく干渉縞を、 $1\ \mu\text{m}$ ごとに平面的にスライスした位相と振幅の2次元画像群でサンプリングしていることになり、式（4）により求められる。

$$S(\vec{r}) = C \times \exp(ikz) \iint s(x_0, y_0) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(xx_0 + yy_0)\right] \times \exp\left[-i\frac{\pi z}{\lambda f^2}(x_0^2 + y_0^2)\right] dx_0 dy_0 \quad (4)$$

このシミュレーション手法で得られたスライス2次元画像群には、対物レンズで集光されながら形成されていく3次元的な干渉縞のほぼ全ての情報が網羅されており、医療分野で用いられている CT

スキャンのように、体積的なホログラムの干渉縞を任意の断面で直感的に把握できるという利点がある。また、得られる画像はスケーラブルであるため、実際に形成される干渉縞の間隔やサイズなどは、波長や画素サイズおよびレンズの焦点距離により変化する。図22に、このプロセスにより実際に得られたデータを模式的に示す。ここでは、振幅データから強度パターンを生成して表示してある。紙面の都合上、シミュレーションした膨大な画像群の中から5枚だけを抜粋して示した。

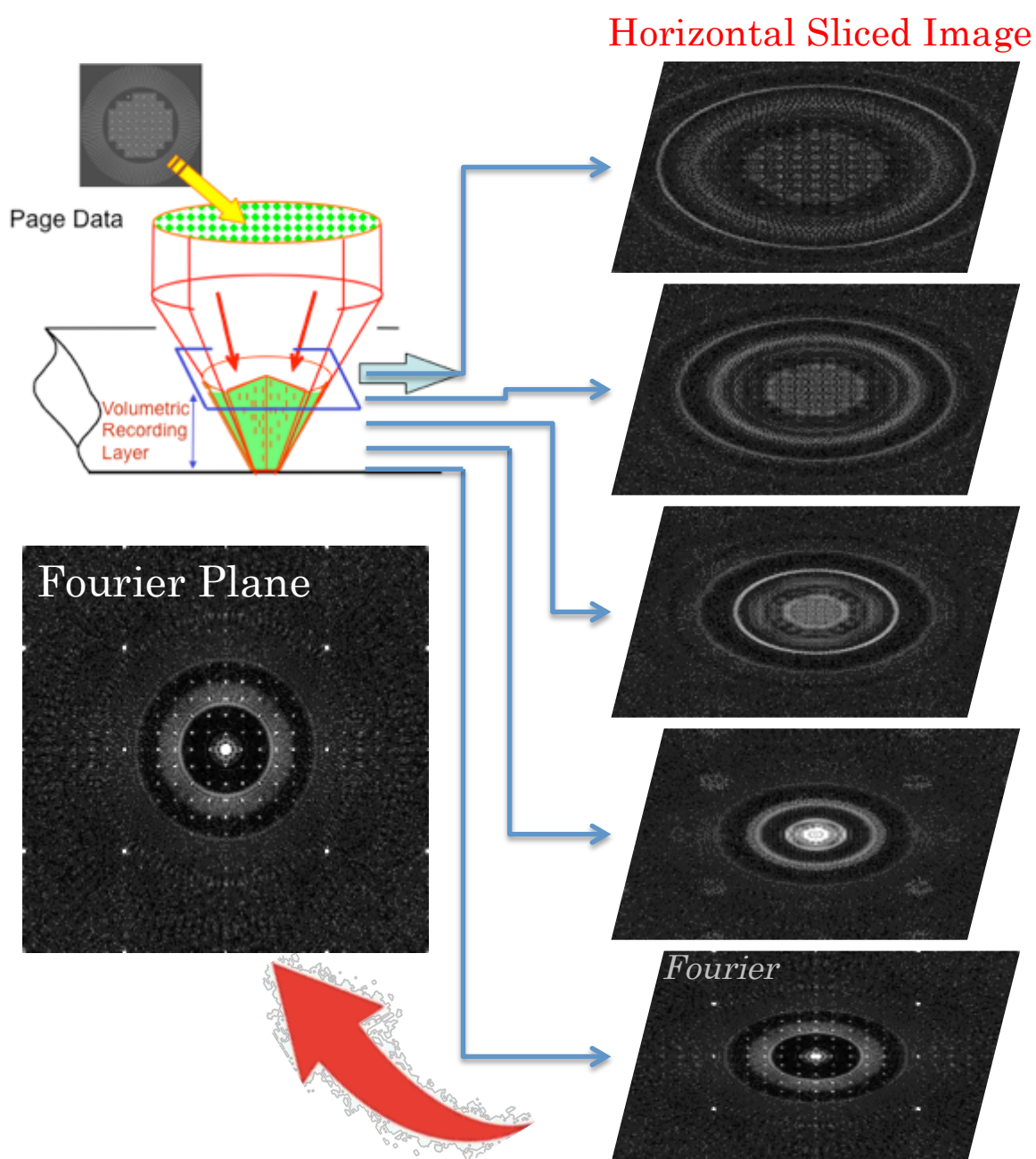


図 22 シミュレーションによる対物レンズ焦点面近傍の干渉縞深層断面図

シミュレーションにより生成された画像を観察していくと、あるところから同じような画像が元に戻るように繰り返されていくため、折り返しの中心位置の画像を対物レンズの焦点位置（DMD に表示されたページデータのフーリエ変換像）であると規定した。図 2 2 は、波長 532nm 、対物レンズの $\text{NA}=0.55$ 、焦点距離 $f=4\text{mm}$ とした場合、焦点位置から約 $100\mu\text{m}$ 程度の厚みまでの水平断面スライス画像となっている。

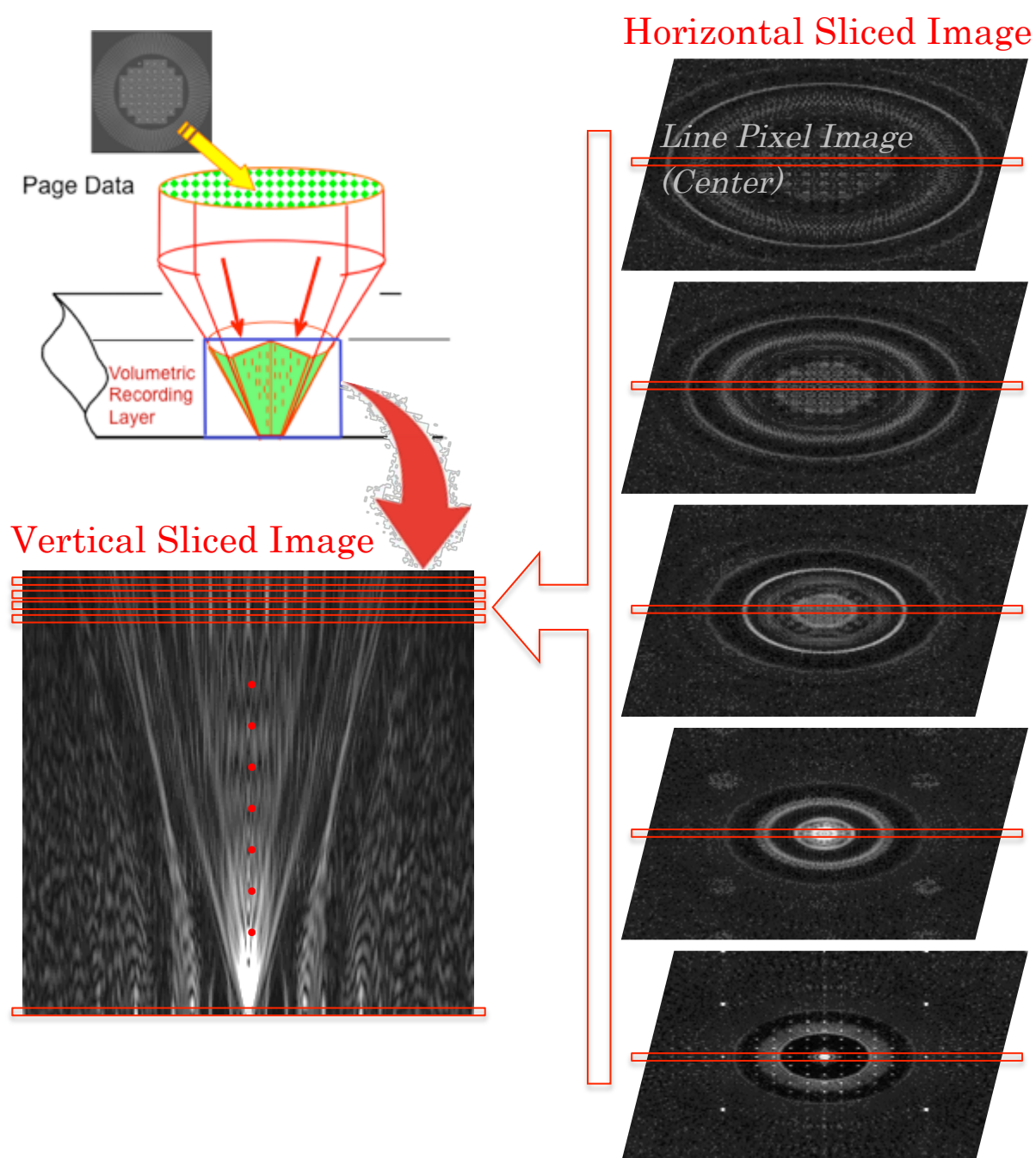


図 23 コリニア方式における干渉縞の任意の端面の可視化画像生成方法

ホログラム記録に大きな進化をもたらしたフォトポリマー記録材料[14]では、干渉縞の強度パターンに応じて屈折率差が生じ、位相干渉縞としてホログラムが記録される。そのため、強度パターンがそのまま位相パターンへ線形的に変換されると仮定すれば、図2-2に示すような強度パターンのスライス画像群が、コリニア方式によって記録媒体の厚み方向へ形成される位相干渉縞パターンと、ほぼ等価であると考えられる。

そのため、厚み方向に組み合わせた水平スライス画像群から、記録媒体中の任意の断面で厚み方向にカットしたような可視化モデル画像も、簡便に生成することが可能である。その方法を図2-3に模式的に示す。図2-3は、光軸中心の垂直断面を可視化した例である。平面スライス画像から、観察したい断面に相当する中心部分の1～数ピクセル分のライン画像を切り出し、これをスライス画像がサンプリングされた間隔（この場合は $1\text{ }\mu\text{m}$ ）に合わせて組み合わせた結果、垂直断面のカット画像を再合成して表示することに成功した。

以上の技術を発展させ、参照光パターンのみの画像と、情報光パターンのみの画像についてもシミュレーションを行なった。図2-5は、図2-4で示すようなページパターンにおける、情報光のみ（左）と参照光のみ（右）の垂直スライス可視化画像である。一方、図2-6は、参照光と情報光が同時に表示された、いわゆる記録時の干渉縞パターンである。このシミュレーション結果より、コリニア方式における参照光と情報光が、それぞれ単独では記録媒体中にどのような位相パターンを形成しているのか、また、それが位相干渉をした場合にどのようなホログラムを形成するのかを、初めて直感的に把握できるようになった。

再生時は、図2-6に示す記録されたコリニア方式の干渉縞パターンに対して、図2-5（右）に示す干渉縞パターンが投影され、そのコンボリューションにより図2-5（左）の干渉縞パターンの逆フーリエ変換に相当する再生像が得られている、と、とらえることができる。

一方、図2-7及び図2-8は、参照光をランダムパターンにした場合の干渉縞パターンの断面である。図2-6と図2-8を比較すると、情報光パターンは両者とも同じであるにもかかわらず、参照光のパターンの違いによって、全く異なる3次元的な干渉縞が形成されることが分かった。

以上の観察結果から、参照光パターンと情報光パターンが組み合わされた時には、異なる干渉縞の断面パターンとなっていることが明らかとなった。このことは、同軸上に進むコリニア方式においても、対物レンズの焦点面近傍ではそれぞれが混ざり合って体積的なホログラムを形成していることが、可視化によって原理確認された。

コリニアホログラフィーの可視化シミュレーションは、同軸上を伝搬していく2次元画像のフランクフォーラー回折の繰り返しで干渉縞の3次元的な構造を解析することができるため、実際には無い仮想設計のデバイスによる効果などもシミュレーションにより検証可能である。例えば、2次元画像情報に位相も加えたパターン表記とすることで、コリニア方式におけるランダムフェーズシフトの最適化設計や、位相多値記録再生におけるコード化の検討などに活用が可能であると考えている。

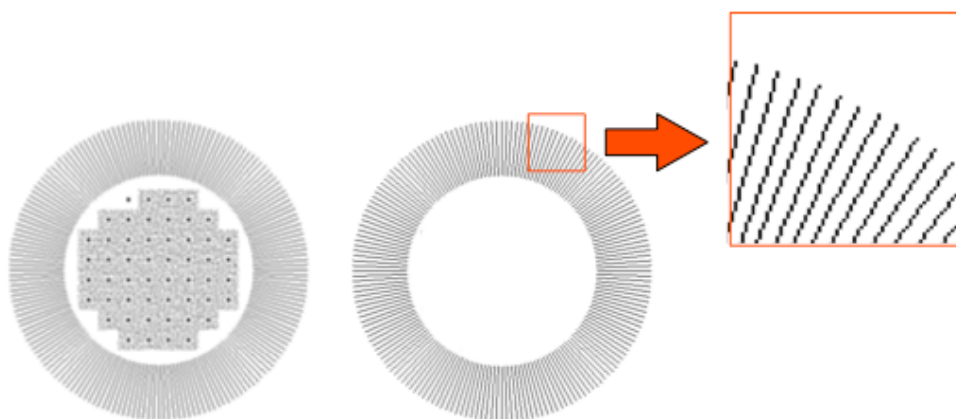


図 24 干渉縞の可視化に用いたページパターン（放射状参照光）

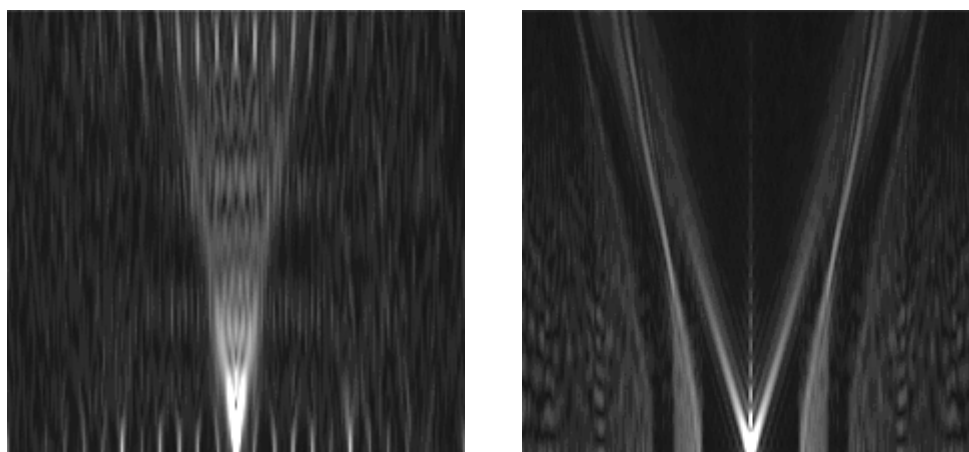


図 25 干渉縞の可視化画像：情報光のみ（左）、参照光のみ（右）

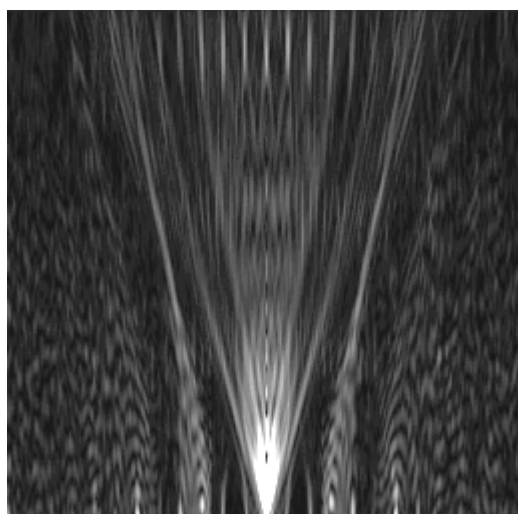


図 26 干渉縞の可視化画像：参照光+情報光のページパターン（放射状参照光）

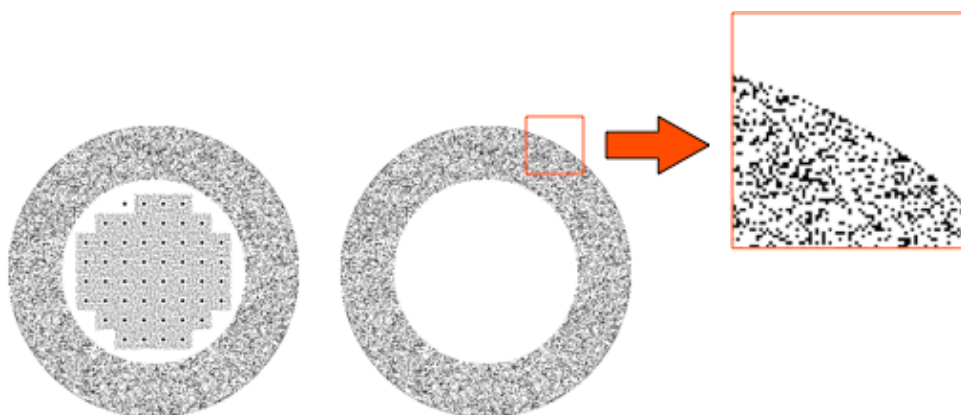


図 27 干渉縞の可視化に用いたページパターン（ランダム参照光）

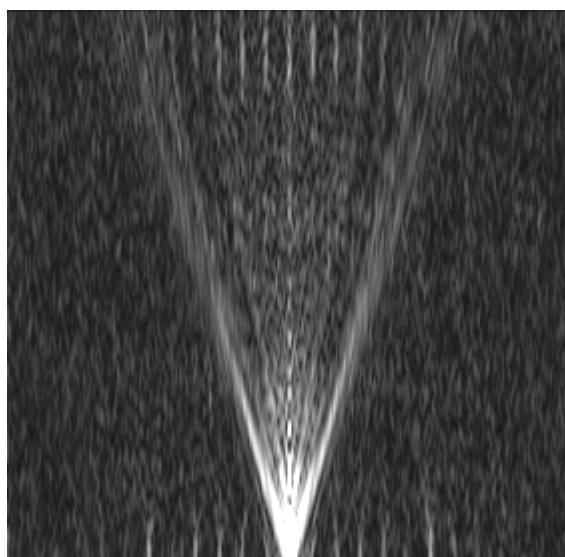


図 28 干渉縞の可視化画像：参照光＋情報光のページパターン（ランダム参照光）

2.5.2 光学的直接観察によるシミュレーションの検証

コリニア方式では、情報光と参照光が同一平面に形成された2次元画像情報としてコモンパスで同軸上に伝搬する。このため、対物レンズの焦点位置と共役な位置で光学的に増倍すれば、上述のシミュレーションに依らずとも、記録媒体中を伝搬する波面の様子を直接観察することができる。例えば、焦点距離 $f_{\text{zoom}}=210\text{mm}$ のレンズを用い、入射瞳面に空間光変調器（DMD）を配置して2次元ページデータを表示した場合、焦点位置には2次元ページデータのフーリエ変換像が大きく拡大されて表示される。ちなみに、対物レンズの焦点距離を $f_{\text{obj}}=4\text{mm}$ とすれば、レンズの横倍率で $m=f_{\text{zoom}}/f_{\text{obj}}=52.5$ 倍、レンズの縦倍率で $m^2=(f_{\text{zoom}}/f_{\text{obj}})^2=2756.3$ 倍に拡大されることになる。

この手法を用いて、まず、上述の数値計算シミュレーションの妥当性を検証した。図29に光学的

な直接観察に用いた光学系の外観を示す。長焦点のレンズとして、EL-Nikkor 210mm f5.6 を用い、DMD を Front Focus の位置に配置した。DMD には放射状の参照光パターンと情報光パターンを同時に表示させ、EL-Nikkor の Back Focus の位置に高解像度で大受光面を持つ CCD カメラ、REDLAKE 社 MegaPlus II を挿入して、撮像面に投影される画像を観察した。CCD で得られた画像を図 30 に示す。DMD からの高次回折像も投影されているが、そのうち最も輝度の大きいところを取り出し、シミュレーションによるスライス画像との比較を試みた。

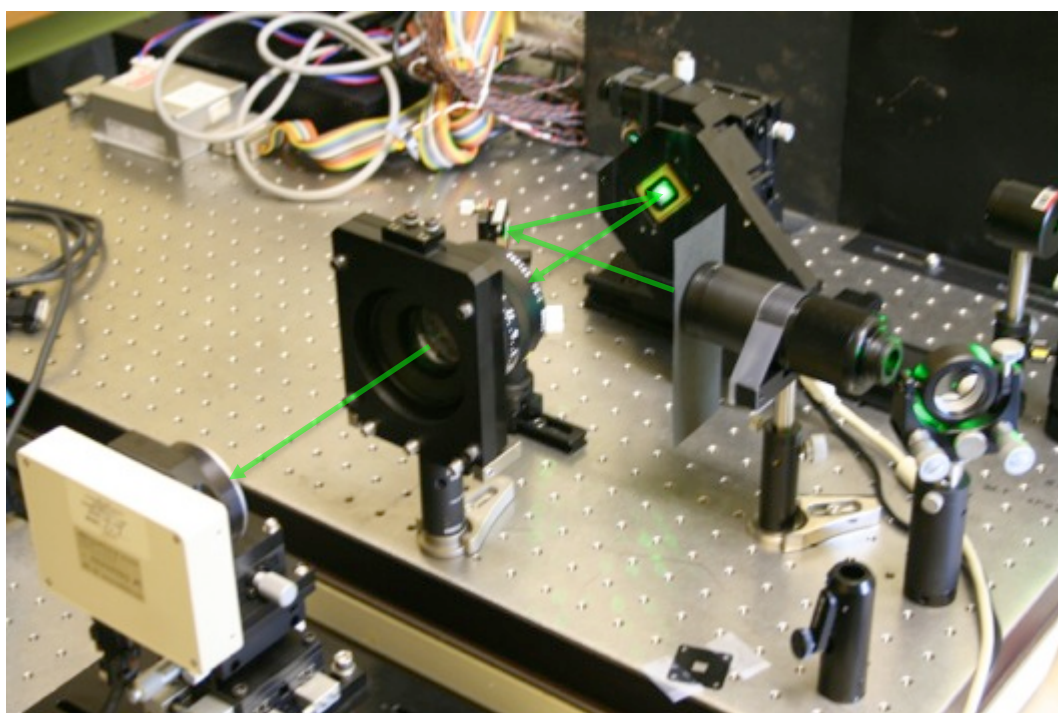


図 29 光学的な直接観察に用いた光学系の外観

図 22 に示した画像群のうち、フーリエ面に相当するスライス画像を選んで比較した結果を図 31 に示す。図 30 に示すように DMD は 45 度傾けて設置されているため、撮影された画像を 45 度回転して比較した。目視での比較ではあるが、DC 成分や高輝度の輝点などの配置がかなり良く一致していることが確認された。

この実験により、数値計算シミュレーションによる干渉縞画像の可視化の妥当性が、光学的な直接観察により検証された。

本手法は、コリニア方式ならではの特徴を生かし、対物レンズ焦点面近傍の干渉縞の様子を光学的に拡大して把握できるため、実デバイスで発生している現象を解析する目的として極めて有効で、かつ、簡便な光学的直接観察法である。今後の研究開発にも、応用していきたいと考えている。

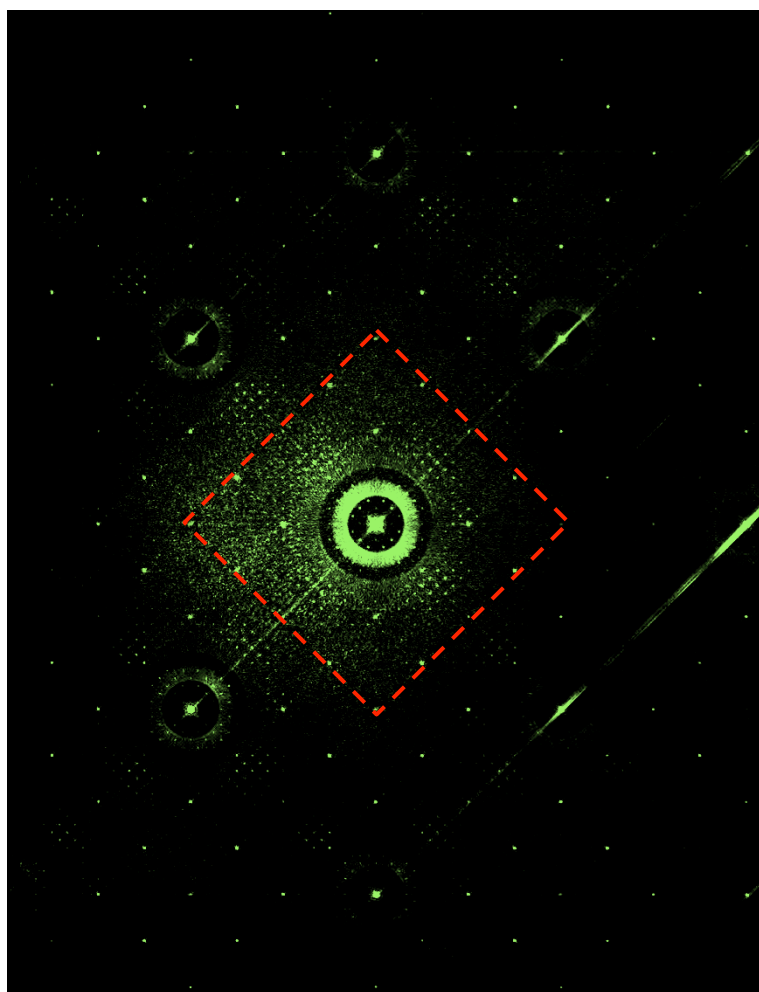
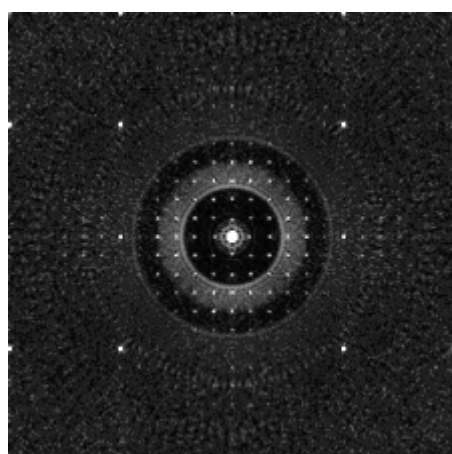
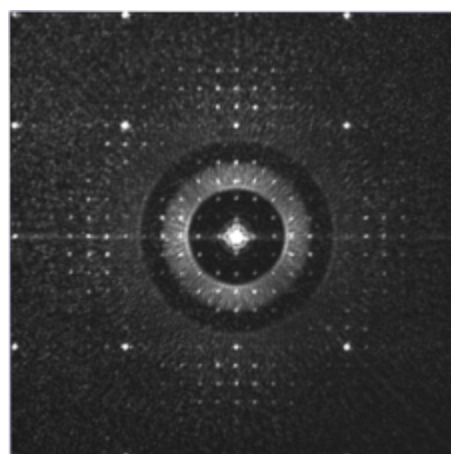


図 30 $f_1=210\text{mm}$ リレーレンズ焦点近傍での DMD ページデータのフーリエ変換観察像



(a) シミュレーション



(b) 光学的な観察像 (45 度回転)

図 31 シミュレーション及び光学的直接観察像によるフーリエ変換パターン像の比較

2.5.3 厚いホログラム記録媒体への均質な露光の実現手法

上述のように、数値計算によるシミュレーションおよび光学的な直接観察の両方で、ホログラム記録媒体の焦点近傍ではコリニア方式によっても干渉縞が形成されるであろうことが可視化によっても確認された。しかしながら、対物レンズの入射瞳面では参照光パターンと情報光パターンは空間的に完全に分離されている訳であるから、焦点面から光軸方向へ離れてくるにつれ、参照光と情報光の干渉割合が減少してしまうことになる。ホログラフィック光メモリーでは、厚いホログラム記録媒体への体積的な記録を行う事により超大容量化を実現する必要があるため、ホログラム記録媒体の厚み方向へできるだけ均質に分散した干渉縞を露光形成することは必須であり、これを実現することがコリニアホログラフィー実用化のための重要な技術課題であった。

このような技術課題を抱える中、DMD デバイスやレンズ等の光学コンポーネントを組み上げながら、光学系のアライメント手順のマニュアル化を行っている過程で、上記の技術課題にブレークスルーを与える極めて重要なコリニア方式のノウハウが発見された。

幾つかの DMD を取り替えながらリレーレンズ L1 および L2 の焦点近傍(DMD のフーリエ変換面)にスクリーンを置いてアライメントを行っていたところ、全く同じページデータを表示しているにもかかわらず、DMD のデバイスによってフーリエ変換観察像にバラツキが生じる現象が観察された。観察結果の中から、典型的な例を図 3 2 よび図 3 3 に示す。アライメント用に置かれた紙のスクリーンに投影されたパターンの輝度分布を、反対側の面から CCD カメラで観察した写真である。高次回折光まで観察するために、アパーチャーは取り外してある。それぞれの図で、DMD デバイスに表示したページデータは (a) ピクセルを全て ON にした All White の場合、(b) 1 ピクセルごとに千鳥状に ON にした Chess Board Pattern の場合、それと (c) 不規則なパターンでピクセルを ON 表示した Random Pattern の場合である。

LCOS などの空間光変調デバイスを用いた場合には、通常は、ピクセルを全て ON にした時には DC 成分のみとなるため、1 つの強力な輝点 (0 次光のみ) となり、対物レンズの焦点面では、どちらかと言うと図 3 2 と同じような輝度分布となる。

一方、DMD では、周期構造を持った「微小な傾いた画素」の集合体であるため、一種のブレード回折格子を形成している。そのため、DMD のマイクロミラーの ON/OFF の傾き $\pm 12^\circ$ に対して製造スペックによるバラツキが $\pm 1^\circ$ 存在するため、極く稀に使用波長 532nm において図 3 3 のような、All White を表示した際に 4 つの輝点を生じる DMD デバイスが存在することが分かった。試行錯誤の結果、最終的に、このような 4 つの輝点を生じる DMD デバイスが、厚み方向へ均質に分散した干渉縞を露光形成するのに適していることを突き止めた。後に、この時の共同研究者の譚小地氏がこの現象を理論的に解明し、特許出願が行なわれているため、詳細はその特許を参考にされたい[12]。

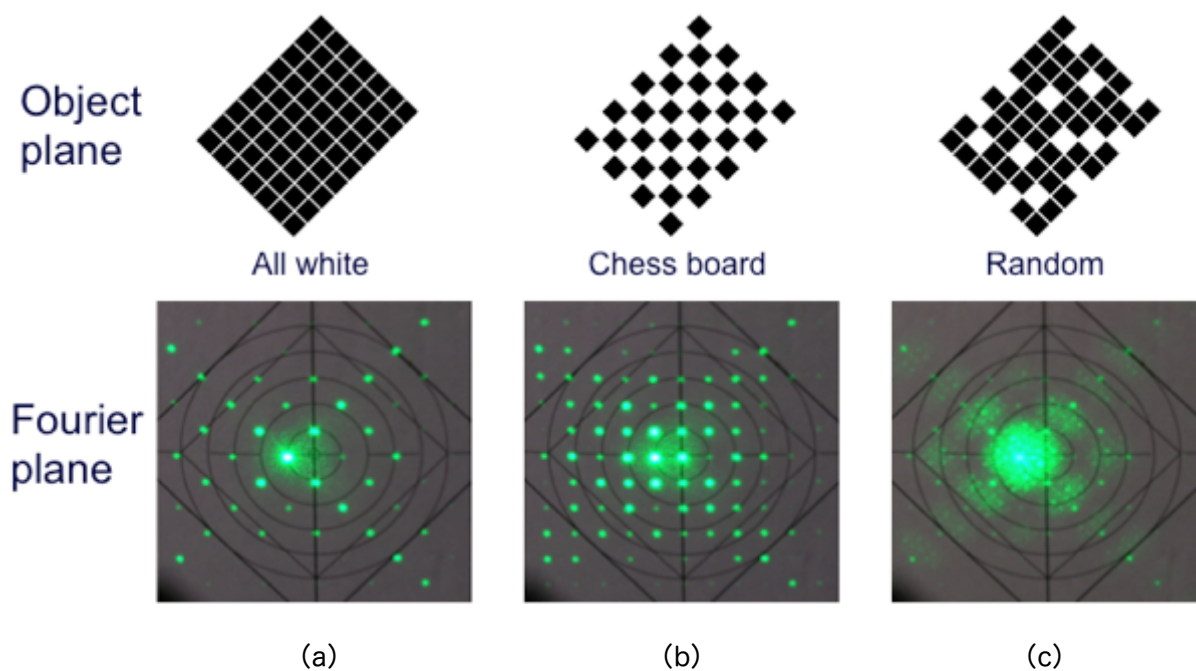


図 32 1つの最高輝度の輝点を持つ DMD デバイスによる焦点面での輝度分布

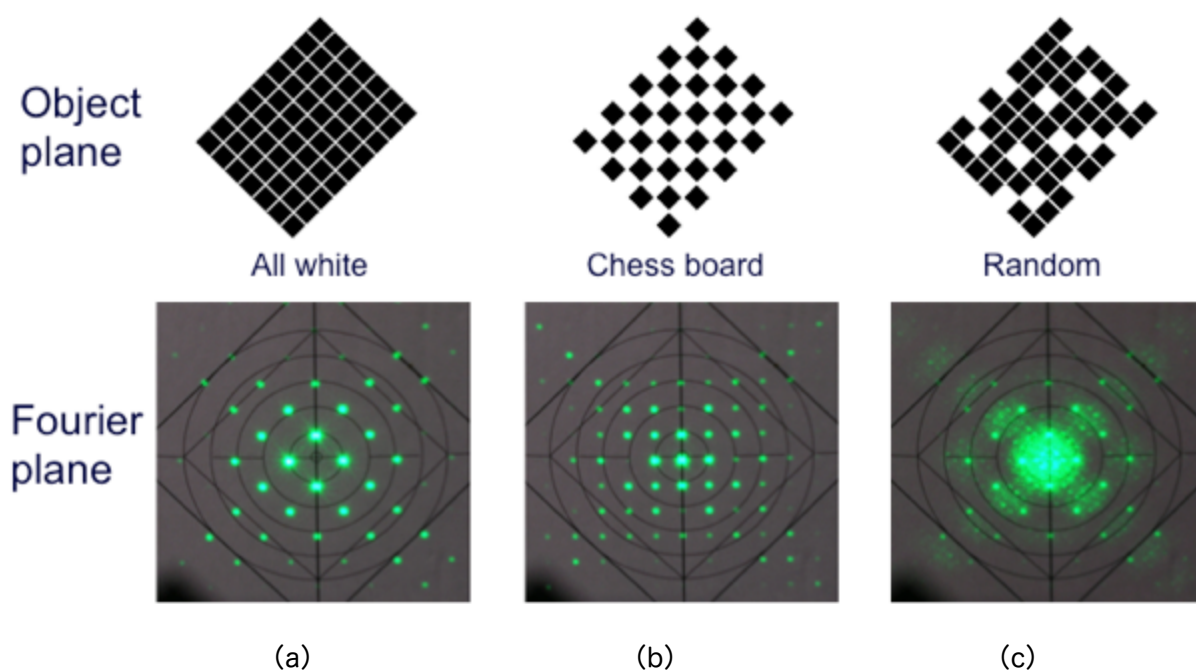


図 33 平均した 4 輝点を持つ DMD デバイスによる焦点面での輝度分布

以下で、4 輝点を持つ DMD をコリニア方式に採用した場合に、厚み $100\mu\text{m}$ を超えるような厚いホログラム記録媒体に対しても効果的に露光が行なわれることを、前述の光学的な直接観察法によって検証した結果を用いて説明する。対物レンズの焦点距離を $f_{\text{obj.}}=4\text{mm}$ 、観察に使う EL-Nikkor レン

ズの焦点距離を $f_{\text{zoom}}=210\text{mm}$ とすれば、対物レンズの焦点面と共役な EL-Nikkor レンズの Back Focus 位置から CCD カメラを遠ざけるにつれて、記録媒体の厚み方向での干渉縞のスライス断面とほぼ同じ状態を観察することが可能である。対物レンズの焦点位置から記録媒体の厚み方向に $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ と離れた位置における干渉縞は、レンズの縦倍率を $m^2=(f_{\text{zoom}}/f_{\text{obj}})^2=2756.3$ 倍とすれば、EL-Nikkor レンズの Back Focus 位置からそれぞれ約 276mm 、 551mm 、 827mm 、 1102mm と離れた位置で観察される干渉縞パターンとほぼ同じであると推測される。図 3 4 に実験した光学観察系の外観を示す。CCD カメラも DMD に合わせて 45° 面内に回転させて配置した。また、写真には示されていないが、撮影の際には、実際の光学系のように EL-Nikkor レンズの焦点面の位置にアパーチャーを配置し、余分な高次の回折光はカットしている。

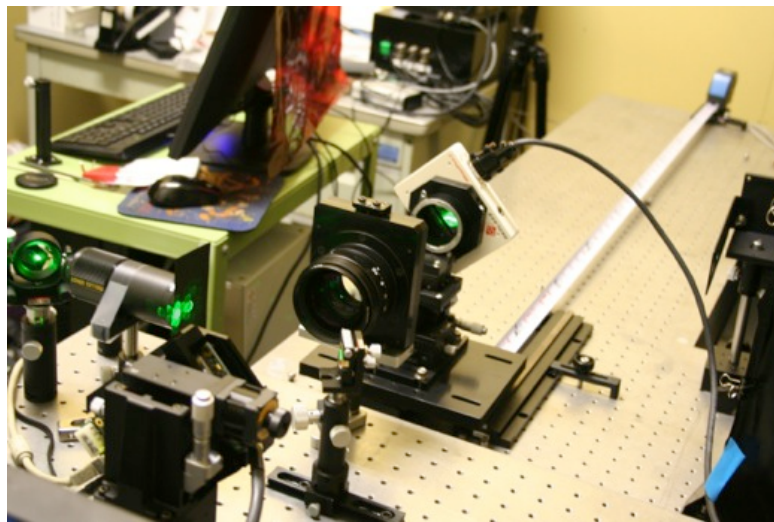


図 34 記録媒体の厚み方向の干渉縞を観察する光学的直接観察系の外観

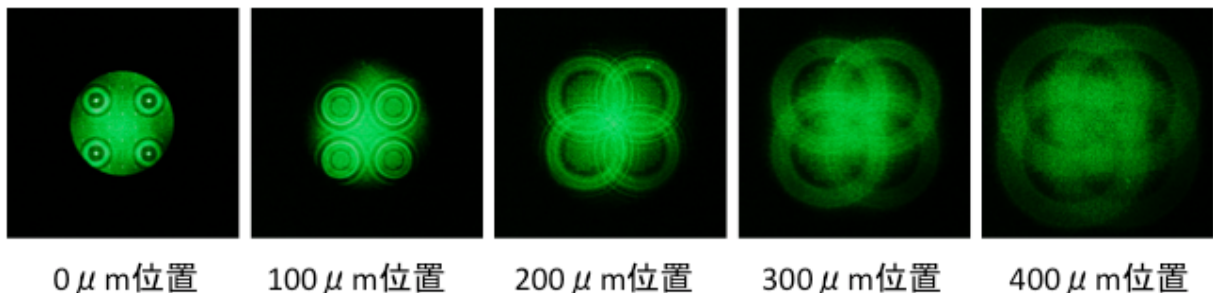


図 35 4つの輝点を生じる DMD により記録媒体の厚み方向に形成される干渉縞観察像

光学系に4つの輝点を生じる DMD デバイスを配置して、上記のそれぞれの距離において観察した画像を図 3 5 に示す。記録材料厚み $100\mu\text{m}$ 相当あたりまでは、4つの輝点は独立しており、それぞれの輝点パターンは数値計算シミュレーションで可視化した画像とほぼ同じように見える。しかし、

これ以上の記録材料厚みにおいては、円環上の参照光に由来するパターンが隣接の輝点のパターンの情報光に由来するパターンに重なり合うように広がっていくことが観察された。

これらの観察結果により、4つの輝点を生じる DMD デバイスを用いてコリニア方式による記録再生を行なった場合、厚みを持った記録媒体に対しても均質な体積ホログラムを形成可能となり、コリニア方式にとっては有効な手段であることが分かった。

2.6 まとめ

参照光と情報光を一つの同じ光軸上に配置して、たった一つの対物レンズを通して記録再生を行うコリニアホログラフィーを考案し、その記録再生原理を説明した。また、実際にページデータを用いて記録再生実験を行った結果、記録に用いたピクセルと同等の鮮明な再生像が得られた。これにより、コリニアホログラフィーの記録再生基本原理が、世界で初めて実験によって実証された。

コリニアホログラフィーを光メモリーへ応用して実用化するための基本コンセプトを検討した。その結果、ホログラム技術と光ディスク技術の融合が成功の鍵を握ることが明らかとなった。これに基づき、コリニア方式によるホログラフィック光メモリーの光学系全体構成を確立した。また、設計したページデータの基本フォーマットについて述べ、3-16 Modulation Coding の機能を説明した。

コリニアホログラフィーでは、参照光と情報光が同一平面内に形成された微小開口から発する点光源として同じ光軸方向へ発する光波の伝搬であることに着目し、フランフォーファー回折の手法を用いたシンプルな数値計算シミュレーション手法を用いて、記録媒体中に形成されるであろう体積的な干渉縞の可視化に成功した。また、光学的な倍率を利用した可視化技術を用いて、DMD の種類によって記録媒体の深さ方向への均質なホログラム記録を行なうための要件も見出した。

参考文献

- [1] D. Gabor, “A new microscope principle,” *Nature*, **161**, 777 (1948).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed Wavefronts and Communication Theory,” *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 1123 (1962).
- [3] P. J. van Heerden, “Theory of optical information storage in solids,” *Appl. Opt.*, **2** (4), 393-400 (1963).
- [4] H. Horimai, “Apparatus for recording optical information,” United States Patent 6,995,882, (Foreign application priority data: Feb 27, 1998 [JP]).
- [5] H. J. Coufal et al Eds., “Holographic Data Storage,” Springer (2000).
- [6] ルーセント テクノロジーズ インコーポレーテッド, “光学製品およびその製造法,” 特許第

- 3737306 号 (1999).
- [7] ポラロイド コーポレイション, “ホログラム媒体およびプロセス,” 特許第 3473950 号 (2000).
- [8] H. Tanigawa et al., J. Photopolym. Sci. and Technol., **14**, 281 (2001)
- [9] G.Barbastathis, M,Levene, D.Psaltis. ”Shift multiplexing with spherical reference waves”. Appl. Opt., Vol. 35, No. 14, pp. 2403–, (1996).
- [10] D.Psaltis, M.Levene, A.Pu, G.Barbastathis, K,Curtis. ”Holographic storage using shift multiplexing,” Opt. Lett., Vol. 20, No. 7, pp. 782–, (1995).
- [11] S.S.Orlov, L.Hesselink, ”Holographic shift multiplexing in thin volumetric media,” J. Opt. Soc. Am B, Vol. 20, No. 9, pp. 1912–, (2003).
- [12] S.S.Orlov, W.Philips, E.Bjornson, Y.Takashima, P.Sundaram, L.Hesselink, R.Okas, D.Kwan, R.Snyder. ”High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system”. Appl. Opt., Vol. 43, No. 25, pp. 4902–, (2004).
- [13] H.J.Coufal, D.Psaltis, G.T.Sincerbox Eds.,. “Holographic Data Storage,” OPTICAL SCIENCES, 76, Springer-Verlag (2000).
- [14] L. Dhar, A. Hale, H. Katz, M. Schilling, M. Schnoes, F. Schilling, “Recording media that exhibit dynamic range for digital holographic data storage,” Opt. Lett., **24**, 487-489 (1999).

第3章

コリニア方式の記録再生特性

3.1 はじめに

ホログラフィック光メモリーでは、多重記録によって記録密度を向上させる。多重記録の方法としては、角度多重[1-6]、ペリストロフィック多重[7]、波長多重[8-11]、位相コード多重[12]、シフト多重[13-17]、スペーシャル多重[18-19]、またこれらを応用したポリトピック方式[20]などが提案されている。このなかで、コリニア方式においては光ディスクの回転に従って自動的に記録位置が移動するシフト多重記録方式が適すると考えた。Psaltis らによって行なわれたシフト多重方式では、記録媒体に対してほぼ垂直に入射される情報光に対して、参照光を球面波として入射することで、記録した位置から再生用光ビームスポットがズレていくと、再生される情報パターンの信号強度が小さくなるという特徴がある。このパラメータは位置選択性、あるいは、シフト選択性（シフトセレクトイビティー）と呼ばれており、記憶容量の理論的な限界を決める極めて重要なパラメータである。隣接ホログラムからの再生信号が無視しうるほど小さくなった位置には、別のホログラムを多重記録することができるため、記録媒体の移動（シフト）による連続したホログラムの記録再生が行なえるという利点がある。しかし、Psaltis らが行なった方式では、この球面波の参照光は垂直に入射されるが、情報光は斜めから入射されるため、記録媒体中に形成される干渉縞の波面の状態が非対称となるなどの理由で、移動方向によっては十分なシフト選択性が得られないという問題があった。

これに対して、同軸配置の光学系構成で、回転する光ディスク状の記録媒体に対しては、Hesselink らによって初めてページデータの記録再生デモンストレーションが行なわれた [21-22]。光ディスクの回転数は 300rpm で、Correlation shift multiplexing と呼ばれる、ランダム位相板から拡散する光を

参照光として用いるという多重方式を採用して、回転方向への多重記録再生を実現した。しかし、スピンドル付属の $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 精度の光学式エンコーダーを基準とした記録再生であったため、光ディスクを脱着すると元データへの位置を再現できずアクセスが困難となる点と、全く同じランダム位相板でなければ装置互換が難しいなどの問題があり、実用化に対しての課題が残されていた。

この章では、コリニア方式による記録再生特性を評価するために開発した実験装置：S-VRDについて概説し、コリニア方式のシフト選択特性の測定結果について述べる。また、実際にシフト多重記録再生を試みた実証実験結果についても述べる。更に、高密度記録に適するデータページパターンとその有効性を数値計算シミュレーションにより検討し、記録再生実験の結果と比較検証した結果も示す。

3.2 コリニア方式記録再生特性評価装置：S-VRD

3.2.1 システムの全体構成

コリニア方式を用いた記録再生特性を詳細に評価するために、ホログラフィック光メモリーシステムと同じ光学パラメータを用いて立ち上げられた実験装置を用いた。正式名称は、コリニア方式ホログラム記録メディア評価装置「スタティック・テスター：S-VRD」である。図36にシステムの全体構成の外観と、図37にオプト・メカニカルユニットの内部構造の写真を示す。光学系の構成は、第2章の図18とほぼ同じである。この装置は、実用レベルで開発されて商品化された世界初のコリニア方式記録再生実験装置である。6軸ステージ制御機能を利用して記録メディアを高精度に位置決めする機構と、ピエゾアクチュエーターと光サーボ機能を連動した対物レンズのオートフォーカス調整機構を備えている。また、検出された再生画像のズレを高速に修正して検出するソフトウェアサーボ機能も搭載している。



図 36 コリニア方式ホログラム記録メディア評価装置「S-VRD」のシステム外観

S-VRD では、コリニア方式によるデジタルページデータを用いた記録再生特性の評価、記録と再生をピクセル単位で比較し[23]、信号対ノイズ比（SNR）による再生信号品質の評価やエラーレートによる定量評価のほか、シフト多重記録特性の評価やメカニカルなマージン評価も行えるよう設計されている。また、光路中に自動で挿入される光検出器が組込まれており、1/2波長板の自動回転ステージと PBS の組合せにより、レーザー光のパワーを任意に設定することが可能である。これにより、非線形な感度を持つホログラム記録材料に対して、スケジューリングを利用した多重記録再生特性の評価も可能である。また、可干渉性が低い LED 光源も組込まれており、ホログラムの記録前や記録後に光路中に自動で挿入されて、対物レンズを通してホログラム記録媒体へ局所的に LED 光を照射することができる。これにより、ホログラム記録材料における露光初期の非感光エネルギー領域の除去を目的としたプレ露光や、露光後に記録材料の感光性を取り除くためのブリーチング処理が行える。

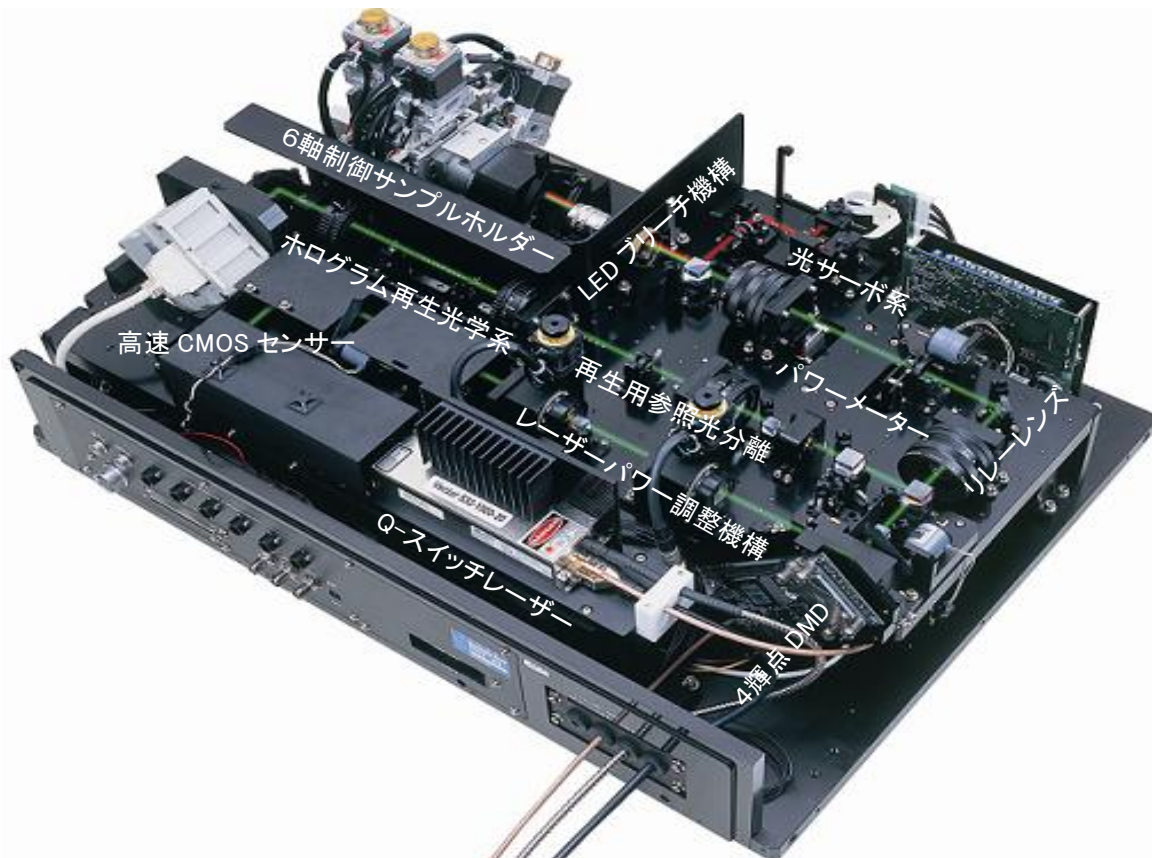


図 37 S-VRD のオプト・メカニカルユニット（メインユニットのカバーを外した内部）

記録再生光学系の特徴としては、高倍率の対物レンズ（NA=0.55）の集光角度による偏光成分の干渉依存性を低減するために、対物レンズの手前に 1/4 波長板（QWP）を配置し、円偏光による干渉光学系を採用した。これは、高速な CMOS センサーへのホログラム再生光を最大化することにも寄与しており、微弱な回折効率の評価に有効である。また、二波長光学系を採用し、ホログラムの記録再

生を行う Q-スイッチ緑色レーザー（波長 532nm）の他に、記録媒体に感光性の無い赤色半導体レーザー（波長 630nm）を用いて、光サーボ機構によるナノ制御を行っている。光サーボを常に動作させていたとしても、記録材料を余分な露光で劣化させる心配が無い。

記録再生特性の定量的な評価のために、3 : 1 6 変調 (3:16 Modulation Coding) によるデジタルページデータを用いて記録再生を行い、記録感度特性や回折効率の評価、および SNR やエラーレートなどがサブページ単位で評価できるよう、アプリケーションソフトウェアが開発されている。S-VRD の記録再生ページデータの基礎特性解析画面の一例を図 3 8 に示す。

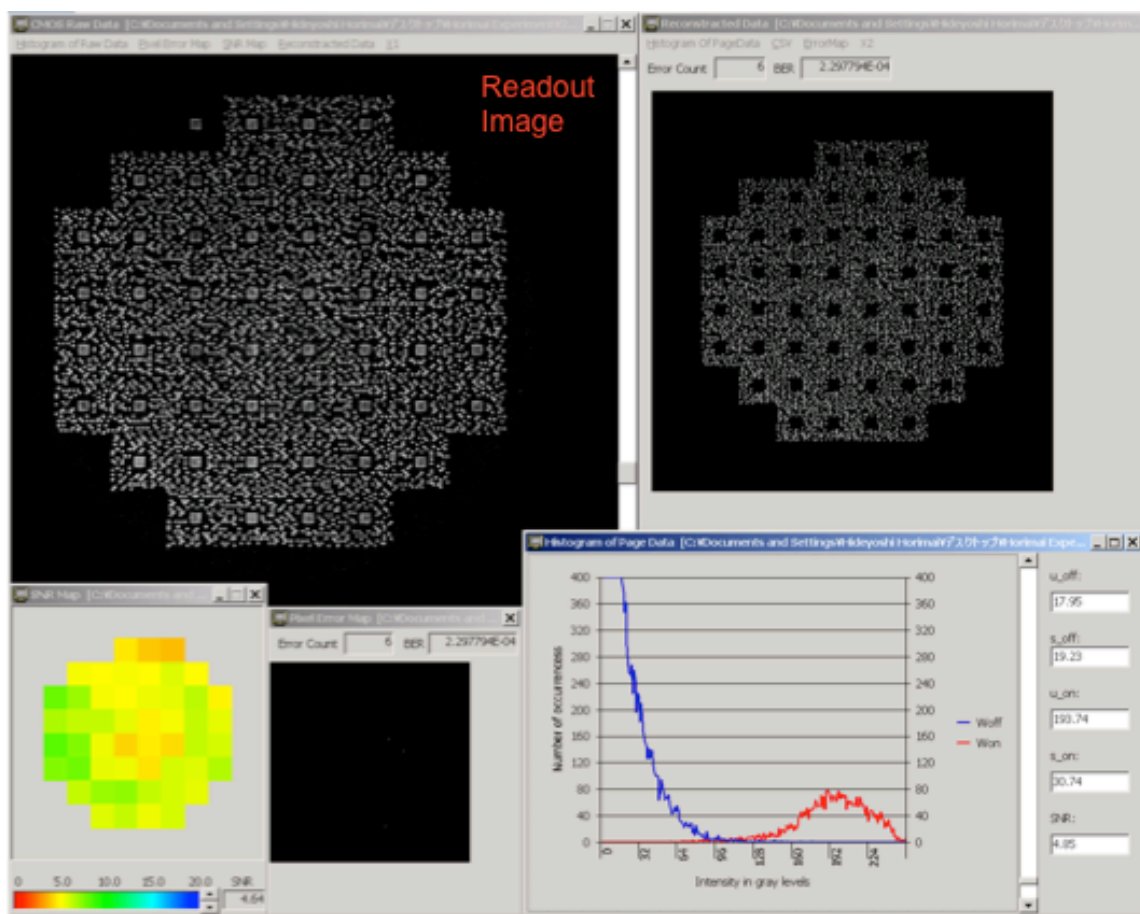


図 38 S-VRD の記録再生ページデータ解析画面の一例

3.2.2 ページデータ記録再生による SNR 特性の評価

S-VRD での評価機能のうち、ここでは SNR 特性（信号対ノイズ比）の評価機能について説明する。実際に、フォトポリマー記録材料に対してページデータを用いて記録再生を行い、測定した結果を以下に示す。

図39は、S-VRDで記録されてCMOSセンサーで検出されたページデータの再生画像である。光ディスクへの記録再生を想定して、再生画像がCMOSセンサー内で移動しても正確にデコードできるように、ソフトウェアサーボによる画像認識機能を組込んでいる。そのため、DMDの1画素分の情報をCMOSセンサーで $3 \times 3 = 9$ Pixelで読み出されるように、3倍のオーバーサンプリングとなるよう光学設計されている。検出された画像（左）の一部を拡大すると、同図（右）のようになっており、3倍のオーバーサンプリングが有効に働いている様子が分かる。

このようにして検出された再生画像は、独自開発の高速ソフトウェアサーボにより、シンクマークを基準とした検出アルゴリズムを用いて位置のズレが補正され、記録ページデータフォーマットにパターンマッチングされるように調整される。その後、CMOSセンサーの $3 \times 3 = 9$ ピクセルで検出された輝度情報に重みを付けて演算し、1ピクセル分の濃度情報として算定される。

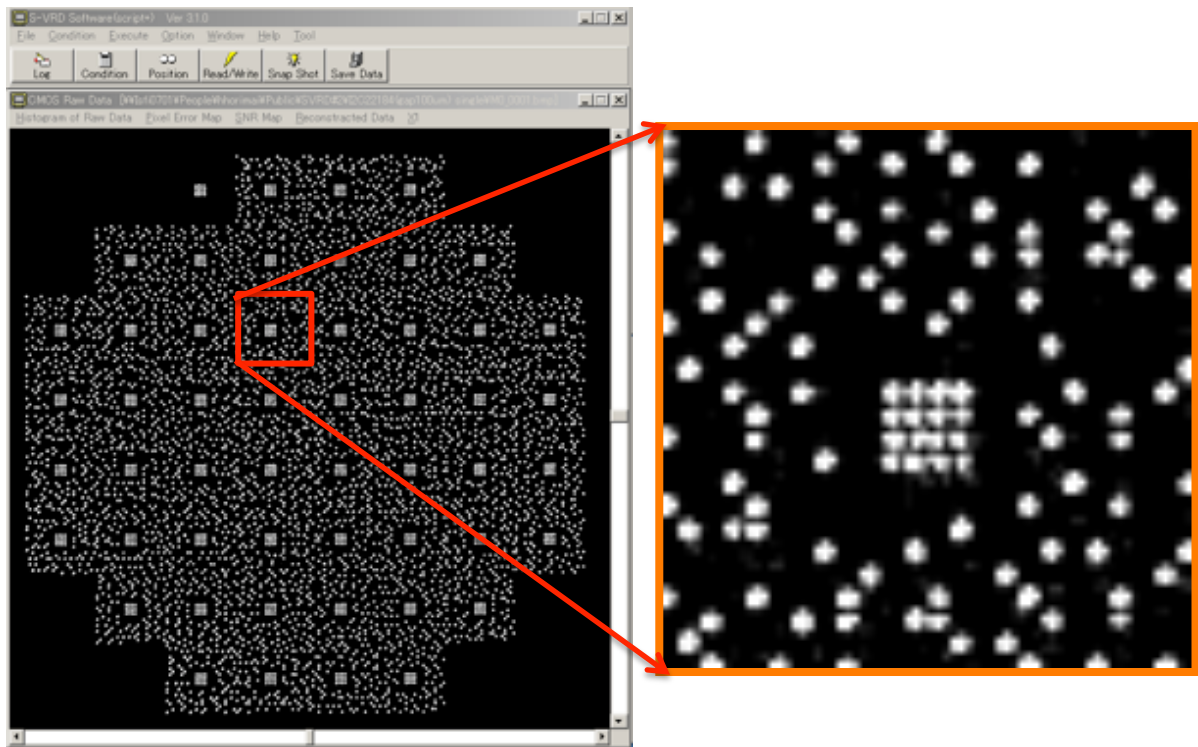


図 39 CMOS センサーでのページデータ再生画像（3 倍のオーバーサンプリング）

このようにして新たに演算し直されたページデータ画像が、SNR やエラーレートの評価用画像となる。評価用画像は、DMD で表示されたページデータパターンと 1 : 1 に対応しているため、再生されたページデータ（評価用画像）の各ピクセルは、本来、そこが ON ピクセルであったのか、あるいは OFF ピクセルであったのかが既知である。そのため、それぞれのピクセル毎の濃度情報から、式（4）により SNR が求められる。

$$SNR = \frac{\mu_{on} - \mu_{off}}{\sqrt{\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2}} \quad (5)$$

ここで、

μ_{on} : ON となるべき画素濃度の平均、 μ_{off} : OFF となるべき画素濃度の平均、

σ_{on} : ON となるべき画素濃度の分散、 σ_{off} : OFF となるべき画素濃度の分散、

である。

図40は、図39の検出画像のページ全体の SNR 評価結果である。Pixel の ON と OFF の分布がきれいに分離されており、式(4)による計算結果から SNR=10.2 という高い値が得られており、多重記録実験に際して十分な画像品位を有する記録材料であることが分かる。

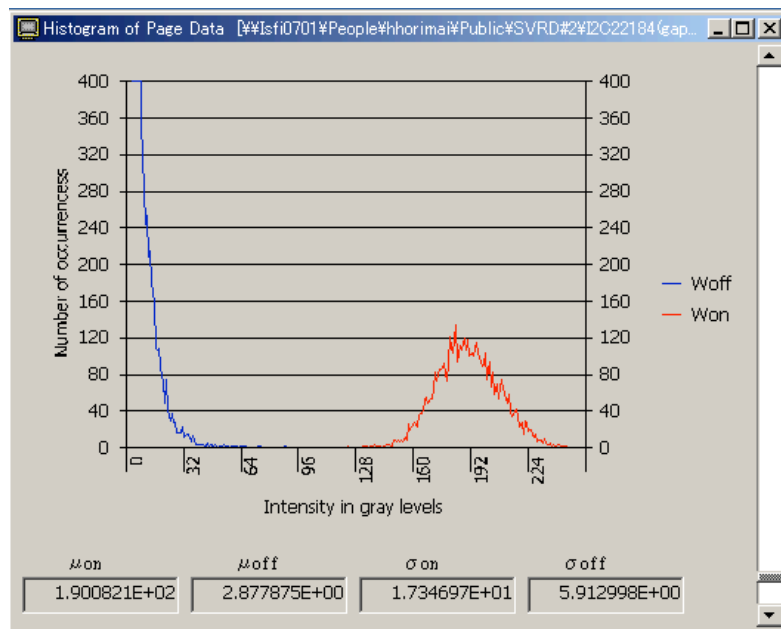


図 40 データエリア全面のピクセル輝度ヒストグラム

3.3 コリニア方式によるシフト選択性

3.3.1 再生位置の移動量に対する再生信号強度の評価

コリニア方式においては、連続回転する光ディスクに対してページデータを On the Fly で記録再生することを目指している。そのため、光ディスクの回転に従って自動的に記録位置が移動されながら多重記録が行なわれるシフト多重記録方式が、システムとの親和性の観点から有効であると考えた。

そこで、S-VRD を用いて、コリニア方式におけるシフト選択性の測定を行なった。実験手順は以下のとおりである。まず、所望の位置にコリニア方式によりページデータを書き込み、LED によるブリーチングを施して連続再生してもホログラムが消失しないようにポストキュアを行う。このあと、位

置を変えずに、このホログラムに円環状の参照光を照射してページデータの再生画像を読み込み、これを基準のデータとする。次に、高精度の6軸ステージを使って、記録メディアを記録した位置からx方向あるいはy方向へと $\pm 1\mu\text{m}$ ずつずらしながら、それぞれの位置におけるページデータの再生を行ない、再生画像を読み込む。

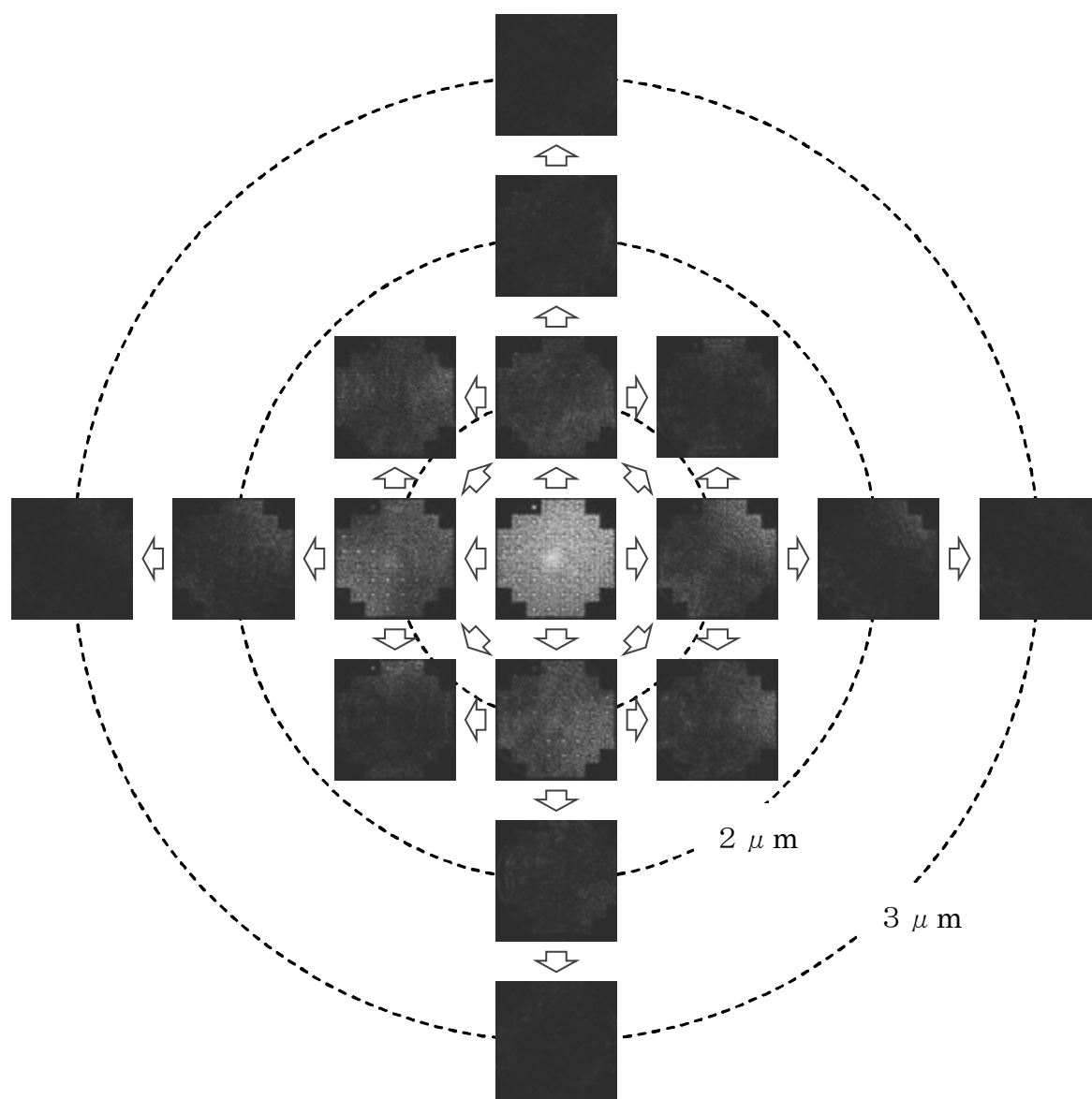


図 41 コリニア方式におけるシフト選択性の評価結果

以上のシーケンスに従って、実際にシフト選択性の評価を行なったところ、意外にも x 方向へも y 方向へも、わずか $\pm 1\mu\text{m}$ だけ位置を移動しただけで、再生像の輝度は急激に低下し、エラーレートの評価が行なわれなくなる All Error となった。再生像の輝度が極端に低下したため、シンクマークが検

出されず、エラーレートの計算の他 SNR の計算も行なえないレベルになってしまったためである。しかし、いずれの場合も、高精度の6軸ステージにより、記録した位置に戻して再生すると、高品質のページデータが読み出され、基準のデータとして保存した内容とほぼ同じとなった。これにより、実験の再現性に問題は無いことが分かった。

そこで、取り込まれた画像データを縮小して、移動した距離の位置にこれらの縮小画像を配置しながら更に移動して画像を取得してみたところ、図4-1のようになっていることが分かった。破線で示した円は、内側から、記録位置から $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ ずつ移動した距離を示している。この結果から、ホログラムを記録した位置から x 方向と y 方向へ $\pm 1\mu\text{m}$ ずつ位置をずらしながら再生した撮影画像は、 $\pm 1\mu\text{m}$ ずれた時点で既に急激に輝度が減少しており、 $\pm 2\mu\text{m}$ までは再生像らしき画像がまだ残されているが、 $\pm 3\mu\text{m}$ になるとほぼ完全に消えてしまっているのが分かった。

この実験結果から、上述のコリニア方式の諸条件においては、隣接するホログラムまでのピッチが $3\mu\text{m}$ 以上あれば、隣接ホログラムからのクロストークの影響は無視しうる程度に小さくなると考えられる。また、シフト選択性に際立った非対称性は見受けられないため、x 方向および y 方向へそれぞれ $3\mu\text{m}$ のピッチでホログラムを敷き詰めて多重記録を行なうことが、原理上、可能であることが示唆された。

なお、露光されたホログラムサイズは、対物レンズの焦点面で約 $200\mu\text{m}\phi$ 程度となっているため、x-y 方向へ $3\mu\text{m}$ ピッチで敷き詰めて多重記録再生が実現すると仮定した場合には、4400 多重以上となり、超高密度大容量ホログラフィック光ディスクの実現が期待される。

本方式は、Psaltis らのシフト多重方式に見受けられるような、移動方向によるシフト選択性の偏りが無く、また、ミクロに見れば、ピクセルごとの参照光は平行光で入射しており、波面の再生原理的にも大きく異なるため、「コリニアシフト多重」方式と呼ぶこととした。

3.3.2 コリニアシフト多重方式の記録再生原理実証

実験的にも $3\mu\text{m}$ ピッチでシフト多重記録を行い、コリニアシフト多重記録再生の原理実証実験を試みた。

隣接ホログラムの記録ピッチは単位面積あたりの密度を決めるため、シフト量は小さければ小さいほど記録容量を上げられるが、多重数は増えることになる。回折効率は記録多重数の2乗に反比例するため[19]、実験を行なった時点においては $3\mu\text{m}$ ピッチで記録メディアを全面記録した場合には、回折効率が極端に低下してしまい CMOS センサーの感度等により再生できないことが懸念された。そのため、一方向にだけに移動したコリニアシフト多重記録再生実験を行なった。

図4-2に記録再生に用いたページデータパターンを示す。参照光は 3° 間隔の放射状としており、参照光の全ピクセル数と情報光の全ピクセル数がほぼ同数となるように設計した。

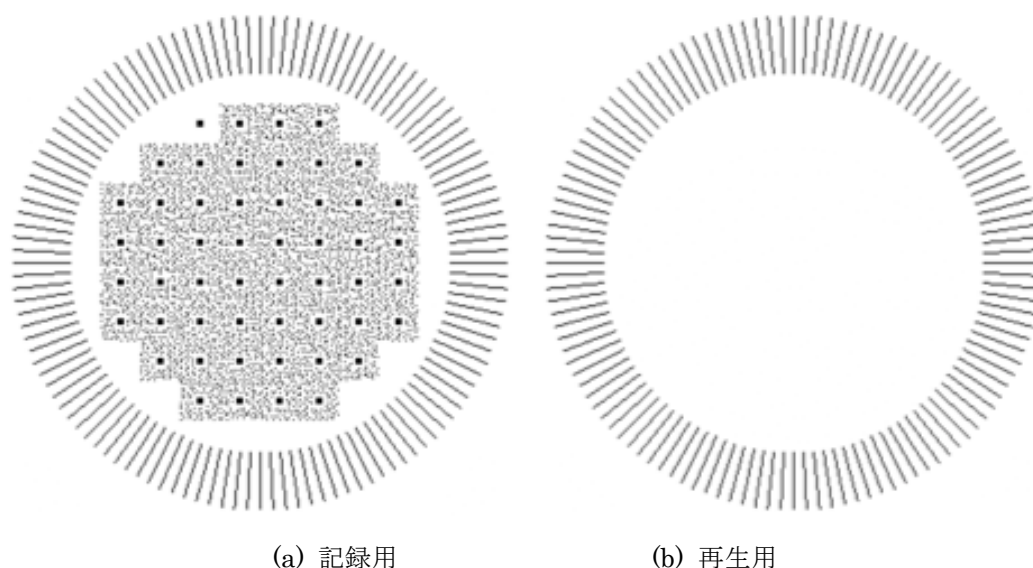


図 42 記録再生に用いたページデータ（参照光：3° 間隔の放射状パターン）

3 μ m ピッチで、20 個のホログラムを全て同一のパワーで記録したあと、LED 光源によるポストキュアを行い、その後、記録メディアを取り付けているステージを精密に移動させて、それぞれのホログラムの記録位置で再生を行なった。

その結果、それぞれの記録位置にもどって再生したところ、全ての位置で記録したページデータの再生画像が得られた。図 4 3 に CMOS センサーで検出された再生ページデータの画像の一部を示す。最初に記録されたページデータが左（1st）、最後に記録されたページデータが右で（20th）、最も多重の多い中央に位置するページデータが真ん中（10th）であるが、コリニアシフト多重を行なったどの再生画像も、S-VRD で解析可能な良好な品質の再生像が得られた。

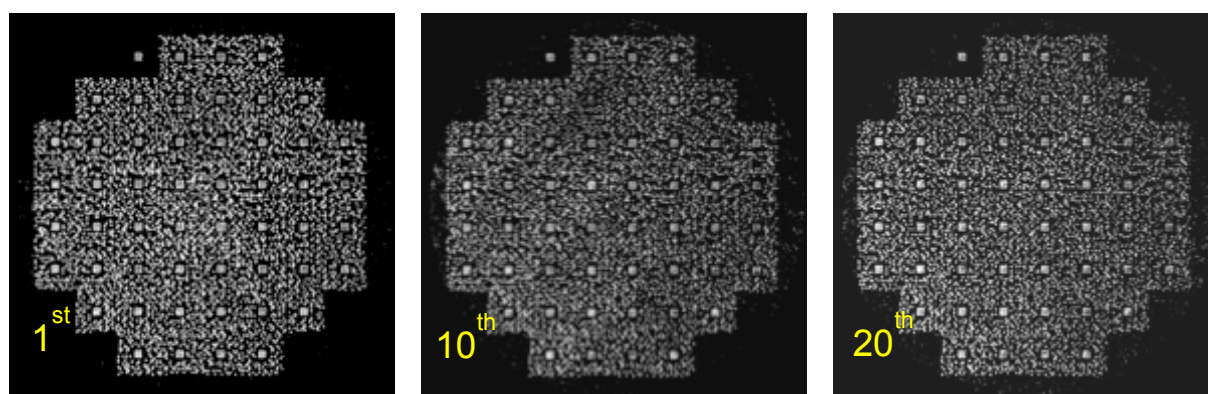


図 43 コリニアシフト多重記録後に再生されたページデータ画像（1，10，20 番目）

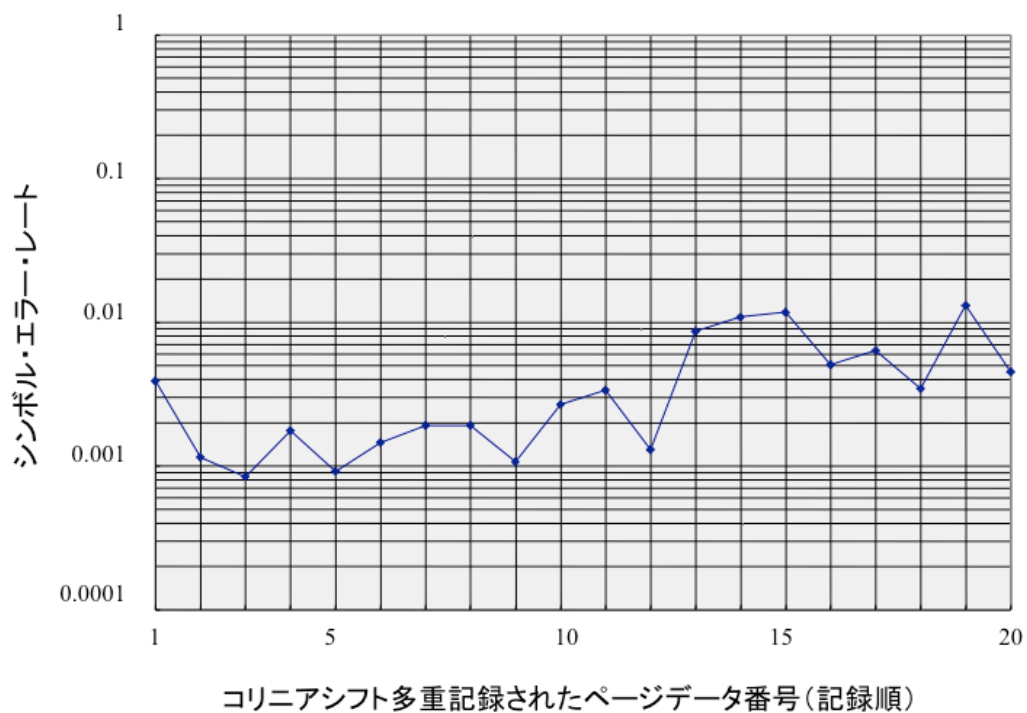


図 44 コリニアシフト多重により記録再生されたデータページのシンボルエラーレート

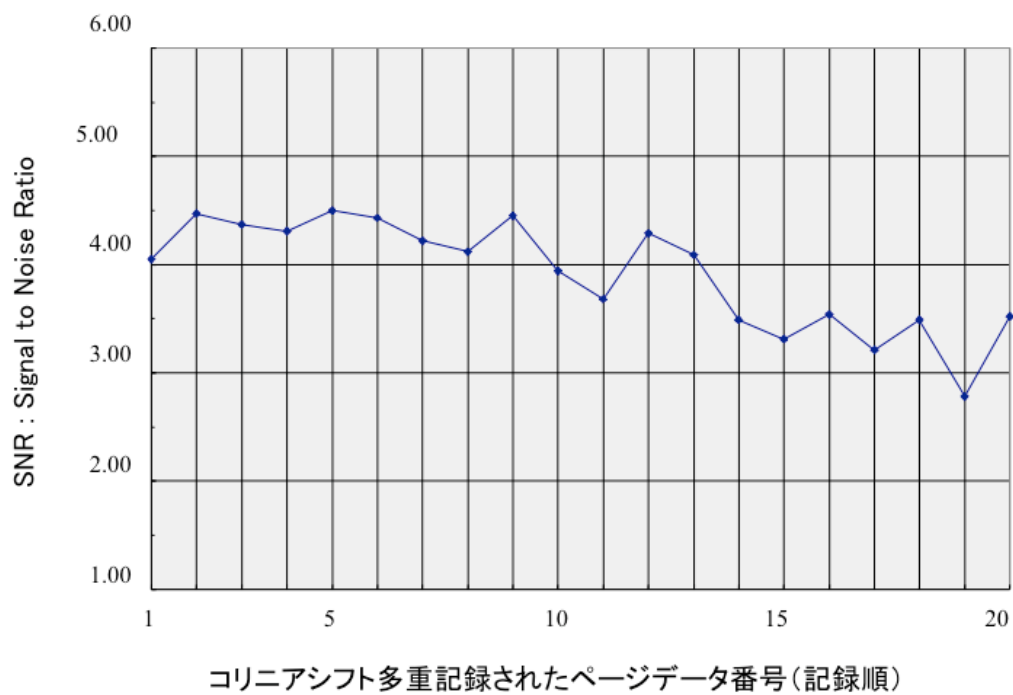


図 45 コリニアシフト多重により記録再生されたデータページの SNR

それぞれの再生画像を解析して得られたシンボルエラーレートと SNR を、図 4 4 および図 4 5 に示す。シンボルエラーレートは 10^{-2} オーダー以下となっており、エラー訂正符号と組み合わせればエラーフリーのホログラフィック光メモリーを実現することが可能である。この実験を通じて、コリニアシフト多重方式が実用的に利用できるレベルであることが、世界で初めて実証された。

3.4 データページのエラー解析

3.4.1 バーストエラーの判定とエラー部の画像観察

コリニア方式では、3-16 Modulation Coding の採用によってデータページ内に発生するピクセルオーダーのランダムエラーには強い。一方、ページ内にエラー訂正符号を組込み、スクランブル配置することで、エラーが局在して大きなエラーとなるバーストエラーに対しても、訂正処理が行なわれる。しかし、エラー訂正処理のために付加される情報量は、ページあたりのユーザーデータ量を減らすことになってしまい高密度記録に影響を与えてしまう他、エラー訂正にかかる処理時間によりデータ転送速度を低下させてしまうことになる。そのため、データページは常に高品質の記録再生ができるような検討を行っておく必要がある。

ここでは、データページ内にノイズが発生している幾つかの CMOS 検出画像を選定し、エラーの発生部分を抽出して解析するとともに、高品質化のための対処法を検討した。

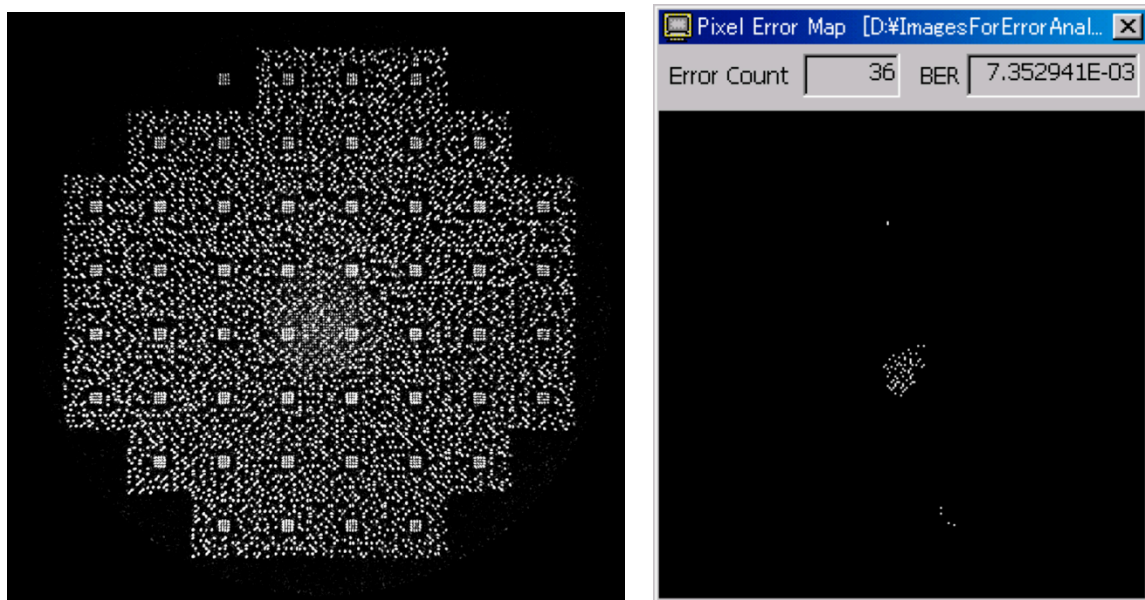


図 46 中心部にノイズが観察される CMOS 再生画像と Pixel Error Map

図 4 6（左）は、連続した円環状の参照光パターンで記録再生した際に観察される、中心部にモヤ

のようなノイズが現れる再生画像である。同図（右）は、この CMOS 画像から Pixel Error を検出し、その分布を表示した Pixel Error Map である。Pixel Error Map 上では、白く表示した部分が Pixel Error となっていることを示している。この Map からは、ランダムなエラーが中心部分に発生しているようにも見える。そこで、ランダムエラーであるのかバーストエラーであるのかを判定するため、以下に示す規定を設けて解析した。

図 4 7 に示すように、S・VRD では CMOS センサーで検出されるデータページを 8 x 8 の Sub-Page 単位のブロックに分けて各種の解析を行なっている。このうち、四隅の 3 つずつと、左角付近に配置された Page Sync Mark は、ユーザーデータ情報のないブロックである。

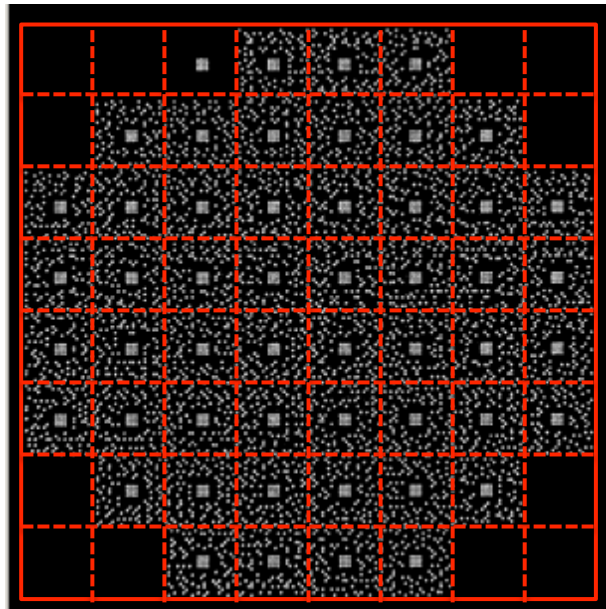


図 47 データページの 8 x 8 Sub-Page Area のブロック構成図

バーストエラーを判定するモデルは、以下のように定義した。

$$N = \sum_i \delta(i) \times subpage(i), \begin{cases} \delta(i) = 1, \text{if the } i\text{th subpage has burst error} \\ \delta(i) = 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、

“0”：ユーザー用のデータではないブロック、

“1”：バーストエラーの発生が検出されないユーザーデータのブロック

(ランダムノイズは存在するかもしれない)、

“-1”：バーストエラーが発生していると検出されたユーザーデータのブロック

(ただし、同一ライン上に 3 つ以上の Symbol Error が連続した場合に、バーストエラープロ

ックと判定。全エラーとは限らない。)

この定義に基づき、上記の図42のCMOS再生画像を解析したところ、図48のような判定結果となった。

```

{0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0},
{0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0},
{0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0},

```

図 48 データページのバーストエラー判定結果：“-1”がバーストエラーブロック

ページの中心部分の“-1”のブロックは、ランダムエラーではなく、バーストエラーと判定された。バーストエラーブロックをCMOS画像から、図45のように切り出して抽出し、更に4倍に引き延ばして、エラーの要因の解析を試みた。比較して解析をするために、バーストエラーの無いブロックも、図50のように切り出し、4倍に引き延ばして比較表示した。

S-VRDにおける評価では、記録時のSymbolパターンは既知であり、これに比較したSNR解析が行なわれる。すなわち、ONとなるべき位置の画素濃度と、OFFとなるべき位置の画素濃度を評価可能である。そのため、参考ブロックとした図50は、図49のバーストエラー部と同じユーザーデータを用いて3-16 Modulation Codeで変調されたものを選んだ。すなわち、配置されたSymbolのONピクセルのパターン配置は、両方とも同じである。

S-VRDの機能を用いて、この同じデータによる二つの抽出画像をSNRにより解析した。図51に解析結果を示す。同図(左)がバーストエラー部、同図(右)がエラーの無い部分である。ONピクセルであるべきピクセル部分の輝度分布を赤で、OFFであるべきピクセル部分の輝度分布を青で示したヒストグラムである。

以上の解析結果から、このバーストエラーを評価すると、SNRのONピクセルのヒストグラムは両方ともほぼ同じように分布しているのに対して、バーストエラーと判定されたブロックでは、OFFピクセルの部分の輝度がONピクセルのヒストグラムにオーバーラップするように分布している。すなわち、3-16 ModulationのONピクセルのパターンが変わった訳ではなく、本来OFFであるべき位置に何らかの要因で黒色にならず、3-16のDecode機能が誤動作してバーストエラーとなったと推測できる。

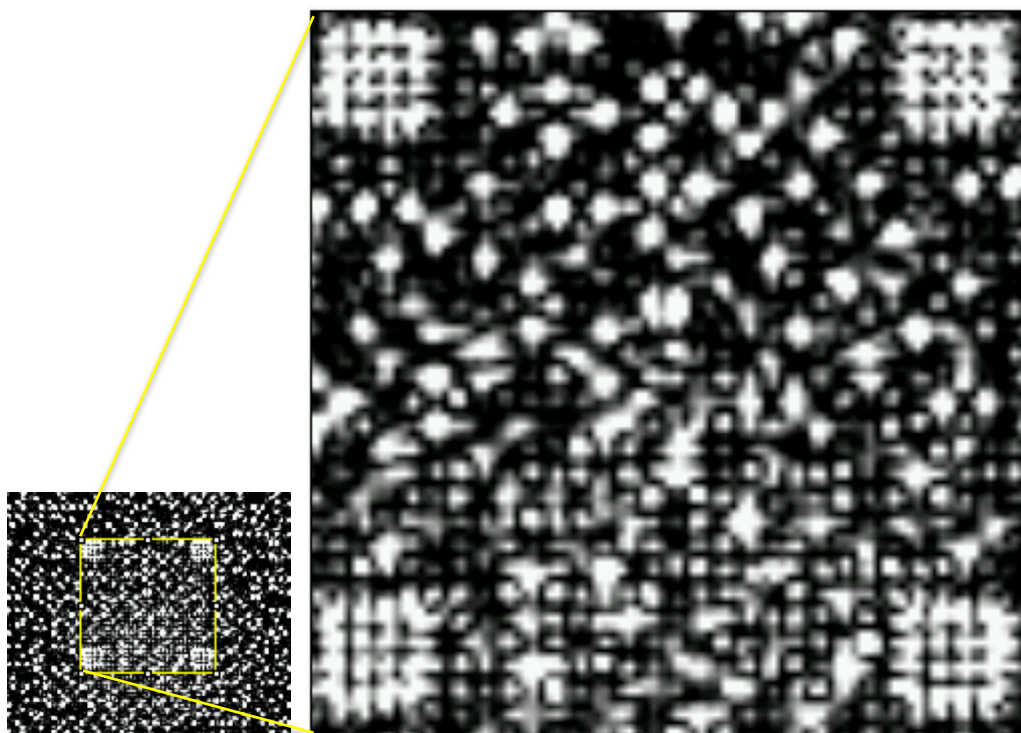


図 49 バーストエラーと判定されたブロック部の CMOS 再生画像

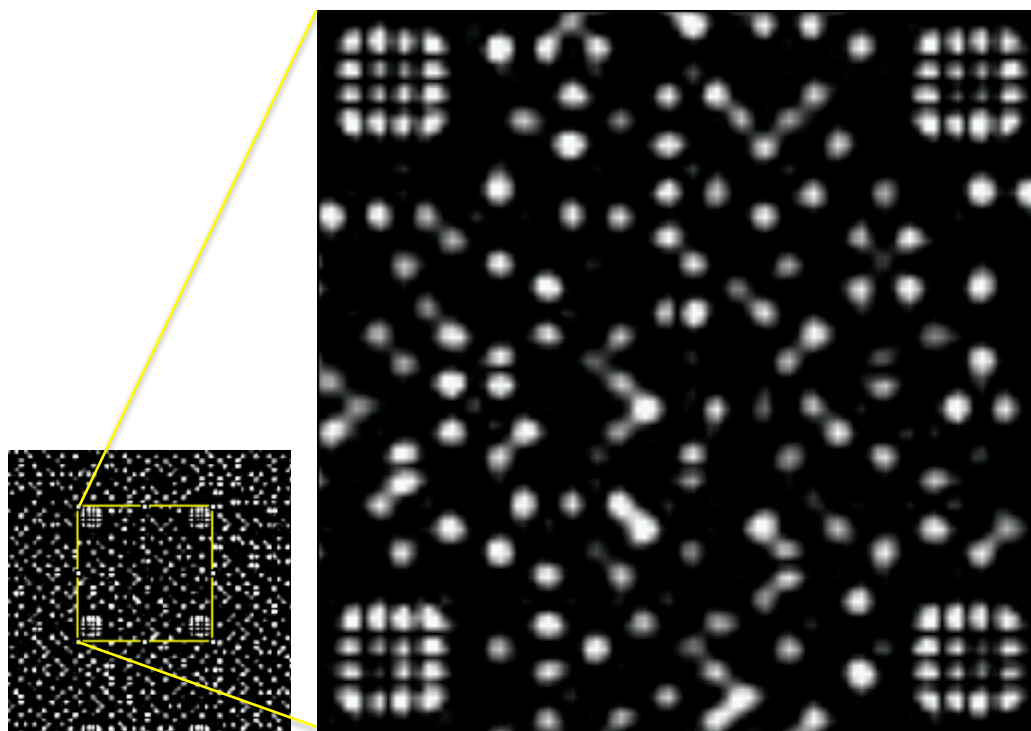


図 50 バーストエラーが無いと判定されたブロック部の CMOS 再生画像

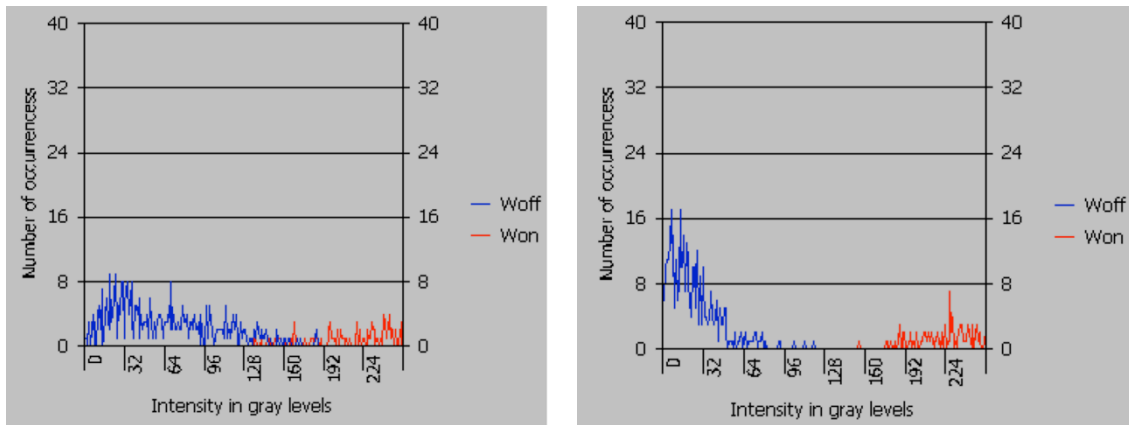


図 51 抽出部の SNR 解析結果：(左) バーストエラー部、(右) エラーの無い部分

画像の観察からも、バーストエラーとなったブロックでは、コーディングされたデータページの ON ピクセルが再生されているのが確認できるが、その周辺に別のノイズ画像が重なって干渉し合っているようにも見うけられる。

以上のような、ページデータの中心部分にノイズが発生現象は、オーバーパワーでの記録再生時や、参照光のピクセルが円周方向に連続するように配置された場合にも観察され、記録媒体の局所的なディフェクトなどに起因しているとは考えづらい。そのため、コリニア方式に特有の原因により、ノイズが発生しているものと考えられる。

3.4.2 数値計算シミュレーションによるノイズ発生原因の推定

そこで、コリニア方式の記録再生プロセスを単純化した数値計算シミュレーションを用いて、ノイズの発生原因の推定を試みた。

コリニア方式の数値計算シミュレーションに用いるモデルを図 5 2 に示す。コリニア方式の記録プロセスでは、一つの情報ピクセルと一つの参照ピクセルを選んだ場合、対物レンズを透過後は二光束干渉法により干渉縞が形成されると考えてよい。そのため、この 2 つのピクセルで規定される干渉縞のモデルは、二光束の平面波同士による単純な周期のグレーティングとして記述することができる。一つの情報ピクセルは、実際には他の参照ピクセルとも総当たりでグレーティングを形成するため、光学モデルとしては、別の単一周期のグレーティングが、多数、多重記録されているとして取り扱うことにする。そのため、数値計算シミュレーションにおいては、記録媒体は多重度に関わらず干渉縞を幾つでもリニアに形成できる理想的な特性を持つと仮定する。

再生プロセスでは、このように形成された一つのグレーティングに対して、任意の一つの参照ピクセルから照射された平面波によって再生される画像を求め、この操作を、他の全ての参照ピクセルに対しても 1 : 1 で行なわれる。次に、また別の一つのグレーティングに対して、同様の計算を繰り返

すことで、最終的には全ての組合せの再生像の総和により再生データページ画像がシミュレーションにより求められる。計算をシンプルにするため、情報ピクセル同士や参照ピクセル同士はグレーディングを形成しないものとする。

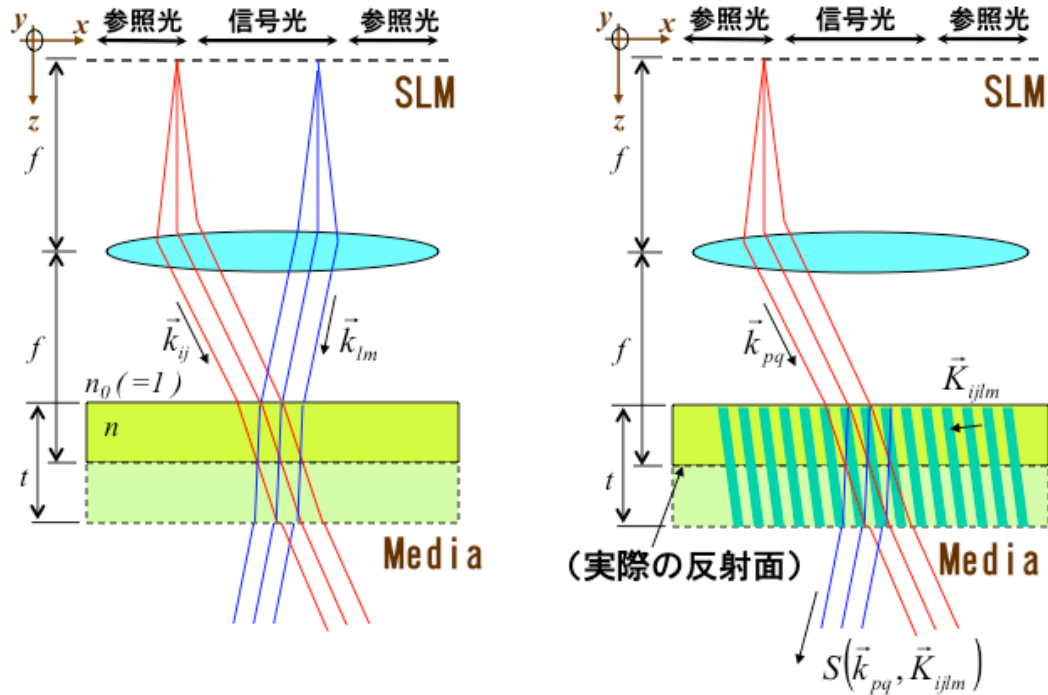


図 52 コリニア方式における単純化された記録再生光学モデル

このように、コリニア方式の数値計算モデルにおいては、計算の数は膨大にはなるものの、ピクセル的に配置された情報光と参照光の個々のピクセル配置が正確に反映されたシミュレーションとなるため、情報光であるデータページパターンと参照光のパターンとの関係を定量的に考察するのに最適な手法といえる。なお、この数値計算シミュレーションの詳細は、Shimura らによって報告されているので、その論文を参照されたい[24]。

この光学モデルを基に再生データページをシミュレーションにより求め、実際の記録再生結果との比較を行なった。図 5 3 にその結果を示す。情報光のパターン（データページ）は同一であるが、輪帯参照光パターンに連続する同心円状のパターンを用いた場合には、再生されたデータページの中心部分にノイズが発生することが確認された。これに対し、放射状の輪帯パターンによる参照光を用いた場合には、ノイズの無い均一な輝度の再生が行なわれるという結果が得られた。また、実際に、数値計算シミュレーションに用いたものと同じ、両方のページパターンを用いて記録再生実験を行なったところ、同図の右に並べて示したように、それぞれのシミュレーション結果と同じような再生画像が得られた。

これにより、データページの中央部分に発生するバーストエラーの原因は、連続する同心円状の参照光パターンを用いて記録再生した場合に発生する特有の現象であり、ページデータパターンの設計に起因するものであることが明らかとなった。また、この解析結果から、試行錯誤的に選択された放射状の参照光パターンではあるが、低ノイズの再生像を得るのに有効なパターンであることが裏付けられた。

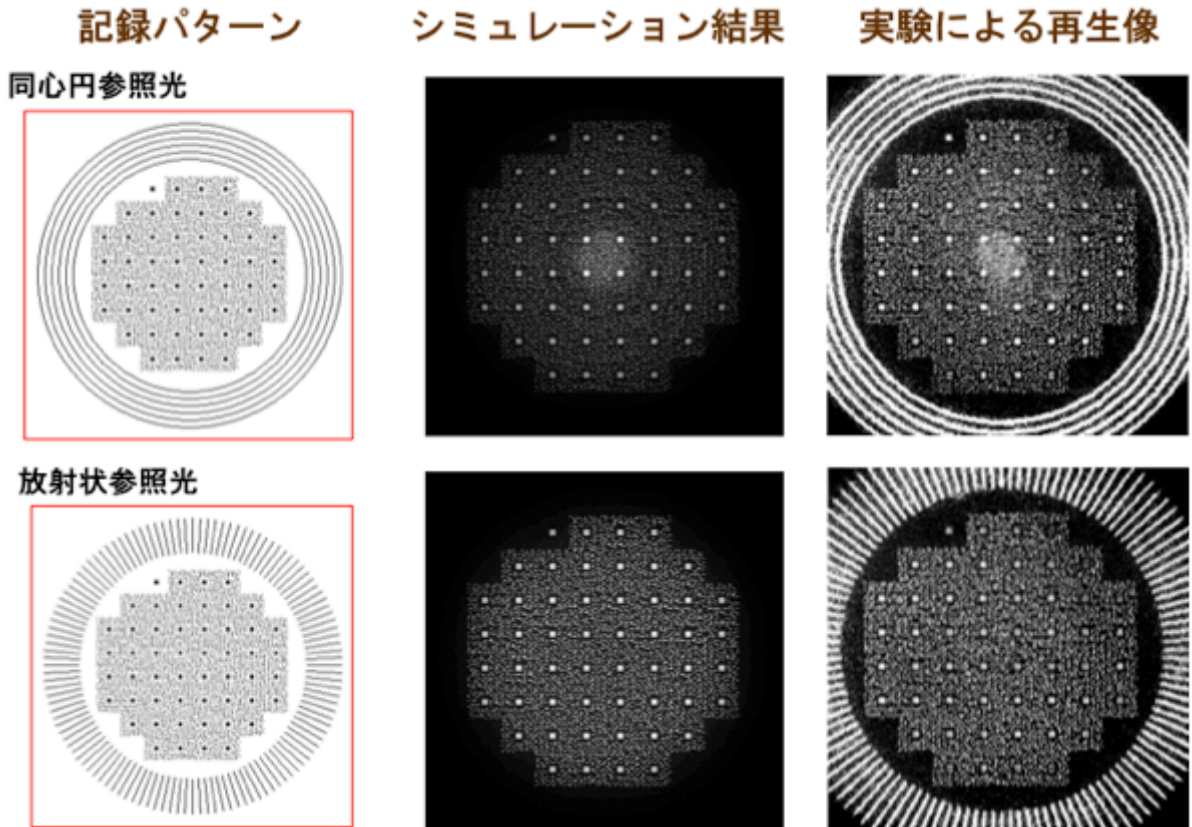


図 53 数値計算シミュレーションによるデータページデザインによる再生品質の評価

3.5 コリニアシフト選択性の数値シミュレーション解析

上述のとおり、記録再生におけるノイズの発生要因が実際の実験結果と良好な一致を示す事が分かり、数値計算シミュレーションの有効性が示された。そこで、次に、コリニア方式におけるシフト選択性の特徴について、単純な数値モデル化によるシミュレーション解析を試みた。

図 5 4 は、メディアが記録位置から面内にシフトした状態のグレーティングと波面の状態を示している。同図（左）は、メディア自体が光学系の光軸（ z 軸）と垂直方向、いわゆる記録媒体の面内方向に移動して位置ずれした時の様子を表している。このとき、記録時の光軸から観察してみると、シフト前とはグレーティングの位相がシフトしてずれているように見える。このグレーティングの位相ず

れは、

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_{\text{shift}} \quad (7)$$

で示される。 $\mathbf{r}_{\text{shift}}$ はメディアのずれを表す。一方、メディアを基準にして考えた場合には、同図（右）のように、メディアに対して入射波の位相がずれたように表される。この場合、光軸と CMOS も入射波と同じように位相がずれる方向へ移動するため、当然ながら、メディアの位置ずれの場合と同じ記述で示すことができる。

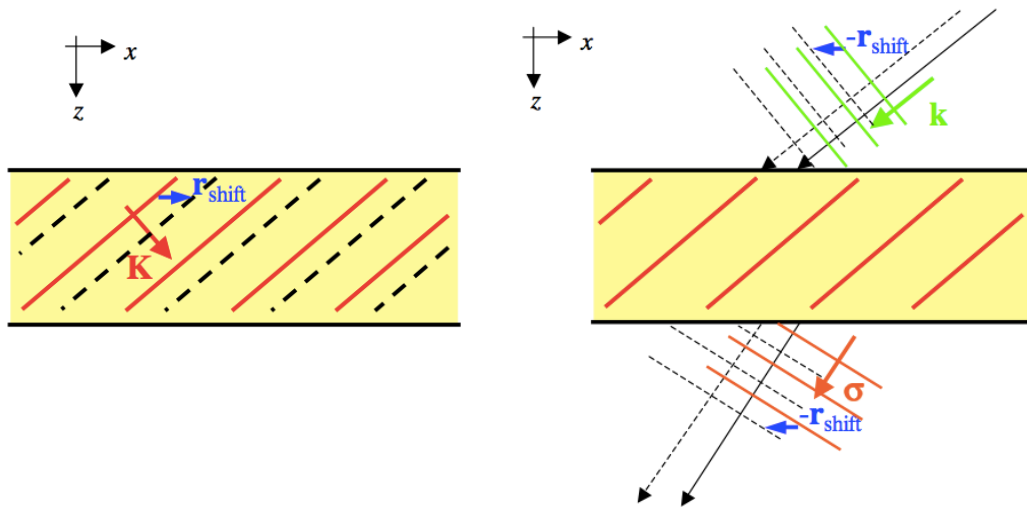


図 54 メディアが記録位置から面内にシフトした状態の数値モデル

コリニアシフト選択性の挙動を把握するために、ページデータの中心の1ピクセルのみが同心円状の輪帯参照光により記録再生された場合を想定する。詳細は省略するが、このような典型的なモデルでは、半径の異なる同心円状の参照光からの再生像の重ね合わせとして記述できるため、シフトに伴う再生信号の変化 $E_{\text{onesignal_shift}}$ は、次式のように、同心円の半径ごとの0次の Bessel 関数の重ね合わせで表す事ができる。

$$E_{\text{onesignal_shift}} \approx \int_{r_{\text{inner}}}^{r_{\text{outer}}} S(r_{pq}) J_0(K(r_{pq}) r_{\text{shift}}) dr \quad (8)$$

0 次の Bessel 関数は、円形の開口による Fraunhofer 回折光 (Airy ディスク) の振幅を記述する際にも用いられているため[25]、コリニア方式の光学系の構成からしても直感的に把握しやすい。

実際に、式 (8) にパラメータを代入して計算した結果を、図 5 5 に示す。この結果から、図 4 1 に示された実際のシフト選択性の測定結果にみられる挙動が、数値計算シミュレーションの解析結果により定性的に説明がつく事が示された。

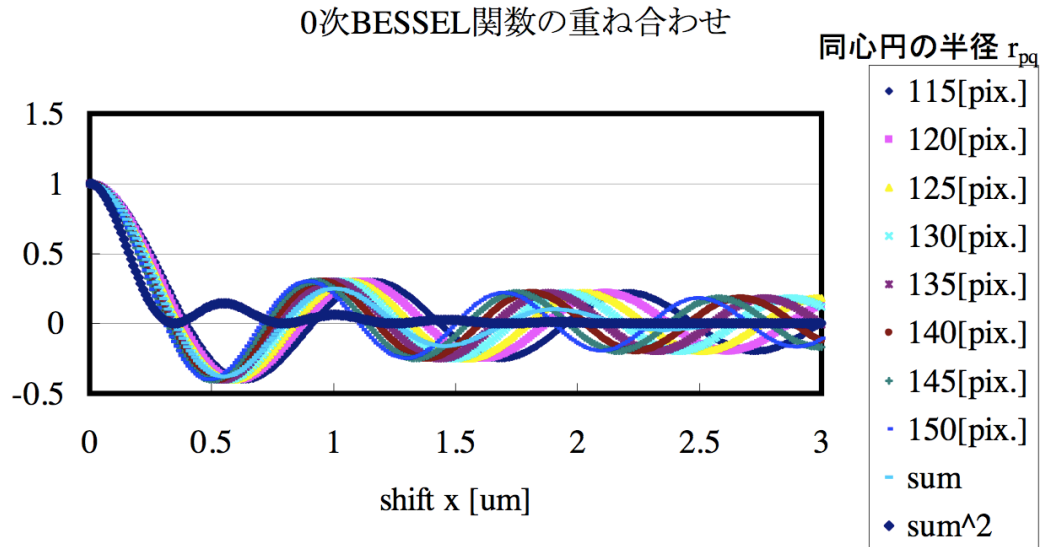


図 55 0 次の Bessel 関数の重ね合わせで表されるコリニア方式のシフト選択性

3.6 まとめ

コリニア方式の記録再生特性を詳細に評価／解析するための実験装置：S-VRD を立ち上げた。この S-VRD を用いて、コリニア方式におけるシフト選択性の測定実験を行なった。実験の結果、ホログラムを記録した位置から x 方向でも y 方向でも $\pm 1 \mu\text{m}$ 位置を移動しただけで、再生画像は急激に輝度が減少し、 $\pm 3 \mu\text{m}$ まで移動すると再生画像はほぼ完全に消えてしまうことが分かった。シフト選択性にシフト方向の偏りは見られなかったため、本方式をコリニアシフト多重方式と呼ぶことにした。また、コリニアシフト多重方式を用いて $3 \mu\text{m}$ ピッチでシフト多重記録再生実験を行なったところ、全ての再生ページデータを、シンボルエラーレートが 10^{-2} オーダー以下で読み出すことに成功した。これにより、コリニアシフト多重方式を用いることで、連続回転するホログラフィック光ディスクドライブシステムでページデータの高密度な記録再生に有効であることが、世界で初めて原理実証された。

また、高密度記録に適する低ノイズで高品質のデータページを記録再生するため、データページのエラー解析を行なった。バーストエラーの判定基準を設け、バーストエラー発生部を抽出して画像を観察したところ、データページの中心部分に 2 重に重なり合うようにしてエラーが発生していることが分かった。そのため、コリニア方式の記録再生を単純なモデルとし、数値計算シミュレーションにより解析した結果、リング状に連続するような参照光パターンに特有のノイズであることを突き止めた。この結果から、放射状の参照光パターンがノイズの発生を効果的に抑制することも分かり、そのパターンの有効性が裏付けられた。

更に、コリニア方式におけるシフト選択性の特徴について、単純な数値モデル化によるシミュレーション解析を試みた。シフトに伴う再生信号の変化は、同心円の参照光による 0 次の Bessel 関数の重

ね合わせで表す事ができる事が示された。この結果から、実際のシフト選択性の測定結果にみられる挙動が、数値計算シミュレーションの解析結果により定性的に説明がつく事が示された。

参考文献

- [1] E.N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Appl. Opt.*, **5**(8), 1303-1311 (1966).
- [2] D.L. Staebler, J.J. Amodei, and W. Philips, "Multiple storage of thick holograms in LiNbO₃," in VII International Quantum Electronics Conference, Montreal, 1972.
- [3] H. Lee, X.-G. Gu, and D. Psaltis, "Volume holographic interconnections with maximal capacity and minimal cross talk," *J. Appl. Phys.*, **65**(6), 2191-2194 (1989).
- [4] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.*, **18**, 915-917 (1993).
- [5] F.H. Mok, G.W. Burr, and D. Psaltis, "Angle and space multiplexed random access memory (HRAM)," *Optical Memory and Neural Networks*, **3**(2), 119-127 (1994).
- [6] G.W. Burr, F.H. Mok, and D. Psaltis, "Angle and space multiplexed storage using the 90° geometry," *Opt. Commun.*, **117**(1-2), 49-55 (1995).
- [7] K. Curtis, A. Pu and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Opt. Lett.*, **19**(13), 993-995 (1994).
- [8] E.N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, J. Marks, and N. Massey, "Holographic data storage in three-dimensional media," *Appl. Opt.*, **5**(8), 1303-1311 (1966).
- [9] G. A. Rakuljic, V. Levya, and A. Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.*, **17**(20), 1471-1473 (1992).
- [10] S. Yin, H. Zhou, F. Zhao, M. Wen, Y. Zang, J. Zhang, and F.T.S. Yu, "Wavelength-multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible-light tunable diode-laser," *Opt. Commun.*, **101**(5-6):317-321 (1993).
- [11] D. Lande, J. F. Heanue, M. C. Bashaw and L. Hesselink, "Digital wavelength-multiplexed holographic data storage system," *Opt. Lett.*, **21**, 1780-1782 (1996).
- [12] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Commun.*, **85**, 171-176 (1991).
- [13] G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," *Appl. Opt.*, **35**, 2403-2417 (1996).

- [14] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, "Holographi storage using shift multiplexing," *Opt. Lett.*, **20**(7), 782-784 (1995).
- [15] L. Dhar, K. Curtis, M. Tackitt, M. Schilling, S. Campbell, W. Wilson, A. Hill, C. Boyd, N. Levinos, and A. Harris, "Holographic storage of multiple high- capacity digital data pages in thick photopolymer systems," *Opt. Lett.*, **23**(21), 1710-1722 (1998).
- [16] G. Barbastathis, A. Pu, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift-multiplexed holographic 3d disk," in *Optical Data Storage Proceedings, San Diego* (1995, SPIE).
- [17] A. Pu and D. Psaltis, "Shift-multiplexed holographic 3-D disk system," in *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, Maui, Hawaii* (1996).
- [18] H. -Y.S. Li and D. Psaltis, "Three dimensional holographic disks," *Appl. Opt.*, **33**(17) , 3764-3774 (1994).
- [19] D. Psaltis, "Parallel optical memories," *Byte*, **17**(9), 179 (1992).
- [20] K. Anderson, "Polytopic Multiplexing," in *Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2004*, 255-257 (Monterey, California, USA, 2004).
- [21] L. Heeselink ans S. Orlov, "Three-dimentional digital holographic optical memories," in *preparation, IEEE* (2000).
- [22] S. S. Orlov, E. Bjornson, W. Phillips, L. Hesselink, R. Okas and R. Snyder, "6 Gbit/sec transfer rate demonstration in a holographic disk digital storage system," *Post deadline Papers, Optical Data Storage 2000*, P31 (2000).
- [23] 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 record- ing physics," *Appl. Opt.*, **35**, 2360-2374 (1996).
- [24] T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, and K. Kuroda, X. Tan and H. Horimai, "Analysis of a Collinear Holographic Storage System: Introduction of Pixel Spread Function," *Opt. Lett.*, , **31**(9), 1208-1210 (2006).
- [25] 栖原 敏明, "光波工学 光エレクトロニクス教科書シリーズ. コロナ社, 第 1 版, (1998).

第4章

コリニア方式のシステムマージン

4.1 はじめに

ホログラフィック光ディスクドライブシステムを量産可能な製品として設計するには、システムの設計許容誤差値、いわゆるシステムマージンが広く確保できることが重要である。コリニア方式で想定するホログラフィック光ディスクでは、最終的にはプラスチック基板にサンドイッチされた記録媒体構造を想定しているため、メカニカルな記録媒体の傾きとなるチルトの発生や、回転に伴う面ぶれ、またホログラフィック光ディスクに予め形成された微小なピットやグループが偏心する事も予想される。

更に、将来の低コストで普及型のドライブを想定すると、光源は半導体レーザーを使用することが予想されるため、温度の変化やドライブ間のばらつきによって、記録時と再生時の波長がシフトすることも考えられる。

この章では、ホログラフィック光ディスクドライブシステムの実用化を想定して各種マージンをリストアップし、それらに対して、実験を通じてその値を評価した結果を述べる。具体的には、フォーカスおよびトラッキングなどの光サーボに直接関係するマージン、対物レンズと SLM 表示位置の許容値など光学系の設計に関係するイメージプレーンマージン、記録媒体の平坦性や傾きに関するチルトマージン、記録再生時の波長シフトに関する波長マージンについて、実際のコリニア方式記録再生装置を用いた実験により評価した結果を示す。また、マルチモード発振する安価な半導体レーザー光源を用いたコリニア方式のページデータ再生特性についての検証結果も示す。

4.2 デフォーカスマージン

コリニア方式では、CD や DVD や HD-DVD などの光ディスクと同様の光学的なサーボ機構を持ち合わせているため、DVD の規格値などを参照してマージンを比較する[1-4]。まず、フォーカスサーボを用いてディスクの基準面に正確に焦点を合わせるが、記録媒体がディスクのようにメカニカルに回転する場合には、ディスクの面振れの振幅や周波数に追従しきれない場合が生じる。すなわち、図 56 に模式的に示すように、焦点位置に残差が発生することが想定される。このような焦点面に対する焦点位置のズレ量をデフォーカスあるいはデフォーカス量と呼ぶ。ホログラム再生に影響を及ぼさないデフォーカス量、すなわちデフォーカスマージンを定量的に評価することは、ホログラフィック光ディスクの機械特性とアクチュエーターの応答特性や対物レンズの重量などを設計する上で重要である。そこで、コリニア方式におけるデフォーカスマージンを、再生エラーレートによって評価した。

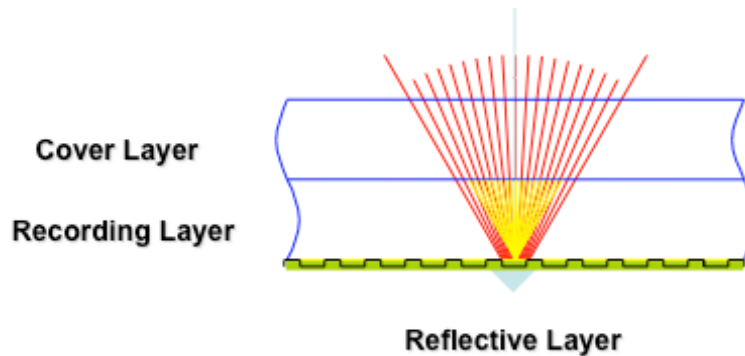


図 56 コリニア方式におけるデフォーカス発生状態の模式説明図

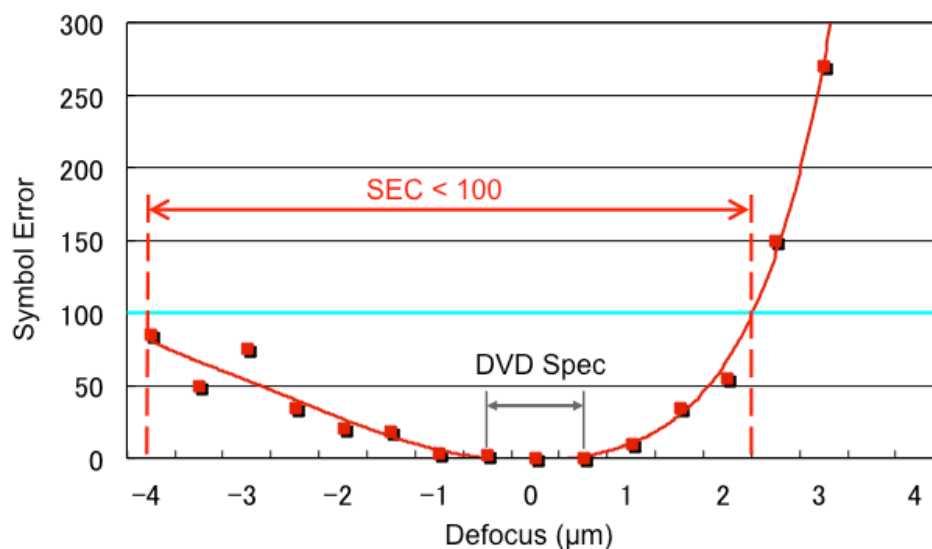


図 57 コリニア方式のデフォーカスマージン評価結果

まず、S-VRD に備えられた光サーボ機構を利用して、基準反射面にフォーカスサーボを掛けてページデータをホログラム記録し、次に、記録メディアサンプルのステージを移動させることにより、記録された焦点位置から記録媒体をずらして移動（デフォーカス）させた位置で再生し、その移動量、すなわちデフォーカス量と Symbol Error の発生数の関係を求めた。エラー訂正の観点から、Symbol Error が 100 個以下であれば許容できるエラー範囲であると考えているため、Symbol Error = 100 に達するデフォーカス量をデフォーカスマージンとして求めた。評価結果を図 5 7 に示す。

評価の結果、デフォーカスの方向がディスクに近づく方向か遠ざかる方向かによって非対称的に Symbol Error が変化するが、Symbol Error = 100 に達するデフォーカス量は、DVD のデフォーカス規格値よりかなり大きく、6 倍以上の広いデフォーカスマージンがあることが実験によって確認された。

この理由としては、光ディスクではデフォーカスによって光スポットの分解能が低下してピット再生信号の品質が劣化し、その結果エラーが増加するのに対して、コリニア方式によるホログラム再生では、干渉縞の波面のミスマッチにより再生が劣化するが、光軸に対して軸対象なページデータにおいては、光軸方向へ焦点がずれても、比較的、波面がマッチングする範囲が広いと考えられる。

実際のドライブシステムでは、DVD と同様のフォーカスサーボを掛けるため、サーボが機能している状態では、フォーカスサーボが DVD のスペック範囲で機能している限り、デフォーカスによってエラーが発生する心配は無いことが分かった。

4.3 デトラックマージン

ディスク回転時には、スピンドルモータの軸ぶれや、ディスクのチャッキング機構の機械精度、さらにディスクそのものの製造バラツキに起因したセンターホールのズレなどにより、記録再生位置が半径方向へずれる、いわゆる偏心が発生する。コリニア方式では、記録再生するホログラムの位置を正確に定めるため、DVD と同様にプリフォーマットされた位相ピットに追従するトラッキングサーボを用いる。しかし、フォーカスサーボと同様、ディスクの偏心は単調ではなく、その振幅や周波数に追従しきれない場合、図 5 8 に模式的に示すようなトラックへの追従残差が発生することが想定される。このように、トラックに対する半径方向の位置のズレ量をデトラックあるいはデトラック量と呼ぶ。

コリニアシフト多重記録再生を確実にこなうためには、このデトラック量が十分に小さいことが必要である。そこで、記録した位置をディスクの面内で微小移動し、その移動量がどのように再生ページデータのエラーを増加させるのかを評価した。図 5 9 にコリニア方式のデトラックマージンの評価結果を示す。評価結果から、Symbol Error が 100 個以下で比較した場合、コリニア方式におけるホログラム記録再生では、DVD のデトラック規格値より 6 倍以上のマージンがあることが分かった。コリニアシフト多重記録の場合、記録した位置から面内に $1\ \mu\text{m}$ ずれると全エラーとなっていたが、この結果から $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 程度のシフト量まではエラーの増加は無いことが分かる。そのため、トラッキング

サーボが DVD のスペック範囲内で機能している限り、デトラックによってエラーが発生する心配は無いことが分かった。また、アドレスを基準とした記録再生を行えば、コリニアシフト多重記録したページデータにも正確にアクセスして、データを再現性良く再生可能であることも分かった。

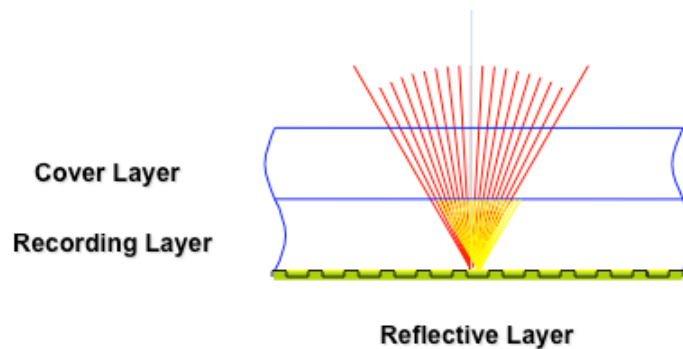


図 58 コリニア方式におけるデトラック発生状態の模式説明図

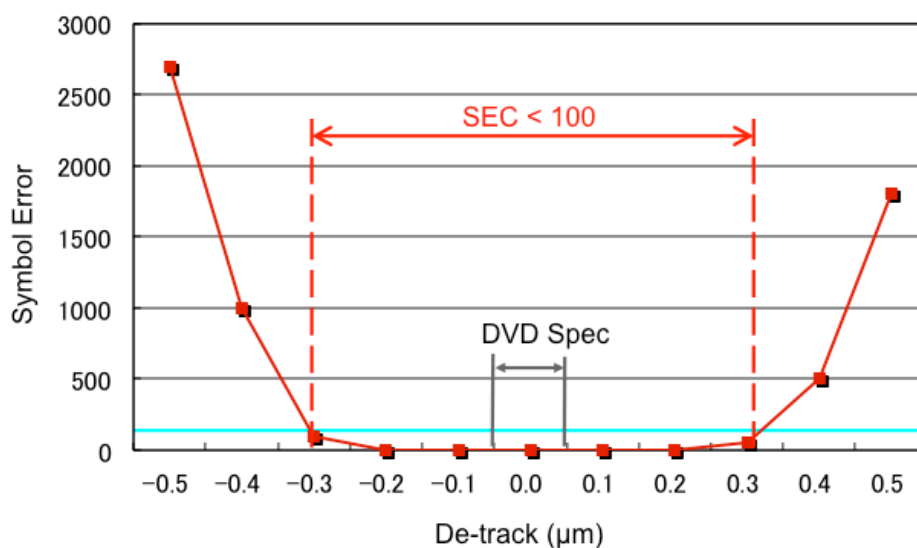


図 59 コリニア方式におけるデトラックマージン評価結果

4.4 イメージプレーンマージン

コリニア方式では、ホログラフィック光ディスクをドライブ装置から着脱してメディアの交換を可能にすることをコンセプトにしている。そのため、同じドライブ装置での記録再生はもとより、異なるドライブ装置間での記録と再生の互換性も確保する必要がある。その観点から、図 60 に模式的に示すように、記録時のページデータの画像位置（図では、リレーレンズで転送された空間光変調器の画像位置）が、記録再生時にどの程度まで軸方向に移動しても良いのかを評価した。これをイメージ

プレーンマージンと呼ぶことにする。実験では、フォーカサーボが正確に掛けられている状態を保ちながら、記録メディアをステージ移動により遠ざけたり近づけたりすることで、対物レンズ自体をフォーカス方向（光軸方向）へ移動させ、ページデータの像を対物レンズの入射瞳位置から相対的にズラした際の Symbol Error を測定した。

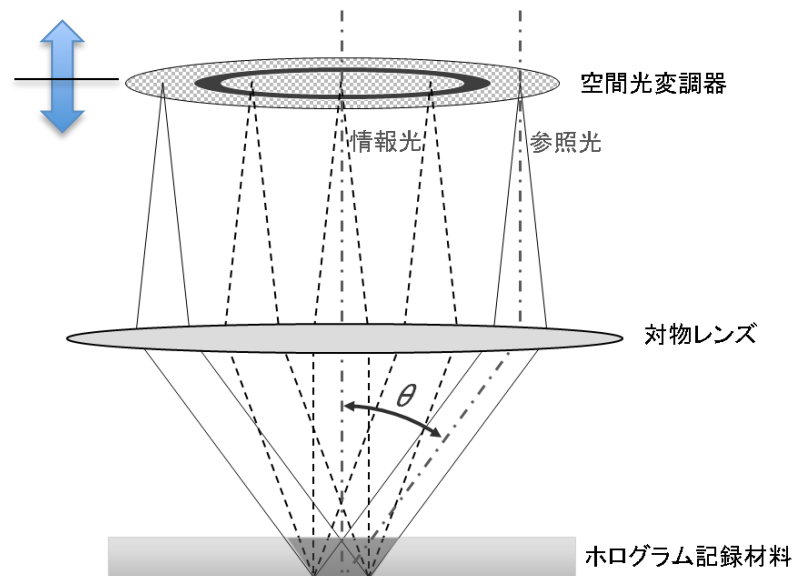


図 60 コリニア方式におけるイメージプレーンマージンの模式説明図

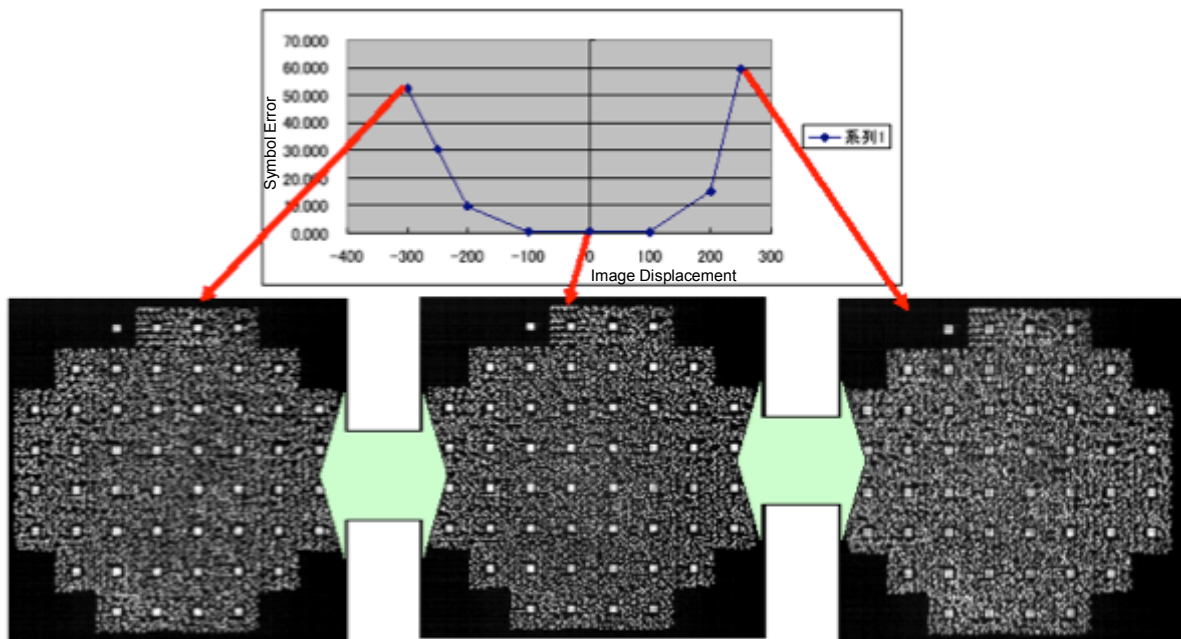


図 61 コリニア方式基本光学系におけるイメージプレーンマージンの評価結果

図6-1はその評価結果である。 $\pm 200\mu\text{m}$ を超えたあたりから、Symbol Errorが急激に増加しているのが分かる。光学系のメカニカルな制約から、これ以上のズレ量での評価はできなかったが、ディスクの面ぶれや偏心に対物レンズが追従するコリニア方式では、このマージンによる影響を考慮して、ドライブの光学設計を行なう必要があることが分かった。

4.5 チルトマージン

図6-2に模式的に示すように、ディスクの傾き（チルト）に対して記録再生がどの程度の影響を受けるのかは、記録媒体が回転する光ディスクシステムにとっては非常に重要なパラメータである。光ディスクのスペックと同様、これをチルトマージンと呼ぶ事にする。一方、ホログラムにおいては、チルトマージンの評価は、次の2つの観点から行われる必要がある。

- (1) 絶対値チルトマージン：どの程度傾いたディスクに対して記録再生が可能かどうか。
- (2) 相対値チルトマージン：記録された後にディスクのチルトがどの程度変化しても良いか。

以下で、それぞれの場合について、実験による評価を行なった。

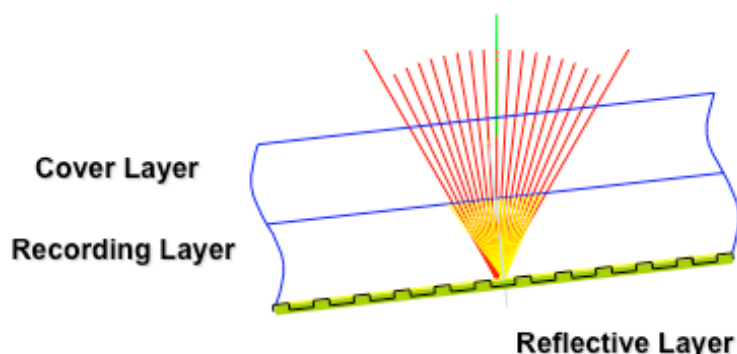


図 62 コリニア方式におけるチルト発生状態の模式説明図

4.5.1 絶対値チルトマージン

絶対値チルトマージンの評価結果を図6-3に示す。反射膜付きディスクの角度を変えて、その角度に対して記録しそのままの角度で再生した。この評価においては、縦軸を Symbol Error ではなく、SNR で示している。ディスクを傾けていくと SNR はゆっくりと低下し、CMOS の画面からも面内にページ再生像がズレて移動していくが、2.25 度傾けてもなお、記録再生による Symbol Error はゼロのままであった。

この理由としては、通常の光ディスクではチルトによって集光スポットには収差が発生し、ピットを再生することができなくなるためエラーの増加が生じるが、コリニア方式の場合、体積的な記録媒体に干渉縞を記録していくため、チルトが有っても収差を含めた形で干渉縞が記録されるため、再生

時も同じチルトの状態であれば波面がマッチングするため、情報はきちんと再生されるためと考えられる。また、記録媒体には反射膜が付けられているため、再生像の進行方向はチルトの2倍の反射角で曲げられて CMOS センサーで受光されていたが、顕著なエラーの発生はなかった。

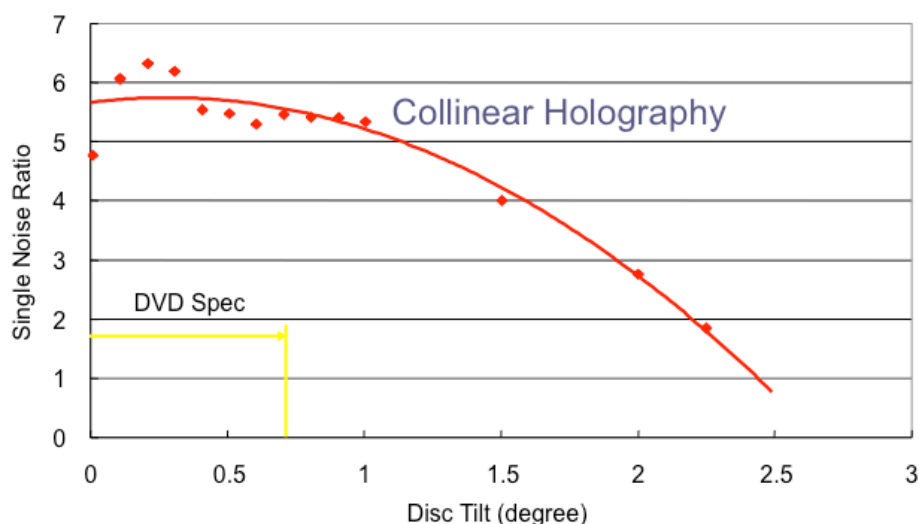


図 63 コリニア方式による絶対値チルトマージンの評価結果

以上の結果から、コリニア方式においても、これまでのホログラムと同じように、記録媒体の形状が記録時と再生時で変化しない限り、絶対値マージンは限りなく大きいと言える。しかし、実際のシステムでは、記録媒体は経時変化により形状が変わることが予想され、また、ドライブ装置を交換した場合にはメカニカルなスペックの範囲内においても相対的にチルトが変化することが予想される。そのため、コリニア方式においては、次の相対値チルトマージンの評価が重要となる。

4.5.2 相対値チルトマージン

相対値チルトマージンの評価結果を図 6 4 に示す。ここでも Symbol Error ではなく、CMOS センサーで校正済みの回折効率（再生信号強度）の変化で特性を示した。この相対値チルトマージンは、従来の二光束干渉法では、参照光の角度を変えて多重を行う、いわゆる角度多重方式の角度選択性に相当する。コリニア方式の相対値チルトマージンの評価に用いた記録材料の厚みは $500\mu\text{m}$ であったため、これに相当する二光束干渉法の回折効率の理論カーブも、参考のために示した。

評価結果から、コリニア方式では、同じ記録材料厚みの二光束干渉法による角度選択性よりも緩めの特性で、回折効率が減衰することが分かった。これにより、相対値チルトマージンは、再生信号強度が半分となる角度で規定した場合、 0.18 度程度であることが分かった。これは、コリニア方式では、軸対象のページデータパターンが、単一对物レンズを通して同軸状にホログラムが形成されることに

より、既に第2章の図2-3で可視化して示したようにコーン状に干渉縞が形成されることから、ディスクが多少傾いてもピボットの波面がマッチングするからではないかと考えている。

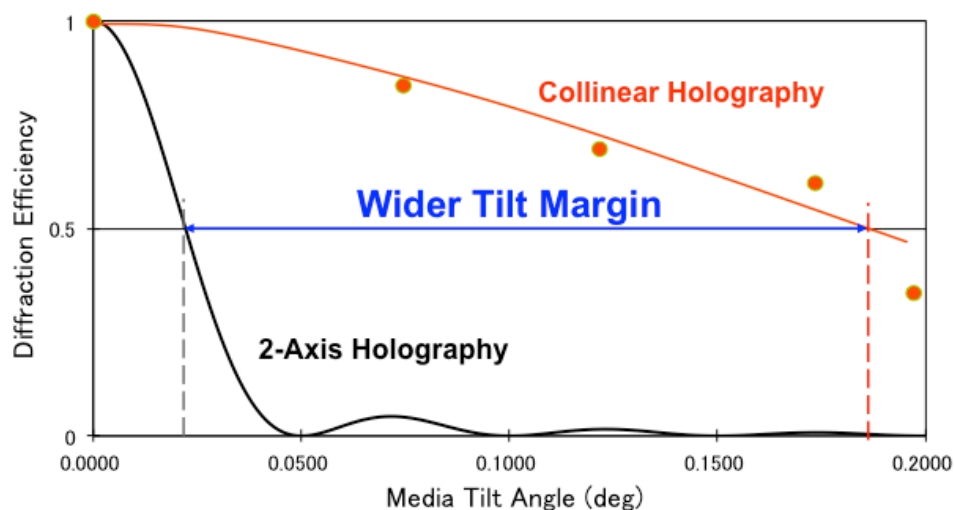


図 64 コリニア方式による相対値チルトマージンの評価結果

光磁気ディスクなどのデータストレージ用光ディスクでは、ディスクのチルトは5 mrad (0.28 度)程度で、また、民生用を考えた場合には DVD のチルトの規格値は 0.7 度であるため、現時点では、ホログラフィック光ディスクの平坦性のスペックを狭めて製造を行なう必要があるが、製造上、難しいスペックではない。そのため、コリニア方式を用いたホログラフィック光ディスクにおいても実用化の土台に乗せられるマージン値であると言える。しかし、今後はページデータの検討によりこのマージンを広くする改善を行なうか、あるいは、コリニア方式に対応したチルトサーボ機構を付加するなどして、ダイナミックな補正を行なう必要があると考えている。

4.6 波長マージン

装置の小型化と低コスト化は、ホログラフィックデータストレージの普及のためには必須である。そのためには、光学系を小型で安価なものにしなければならない。ドライブのコストを考えた場合、特に、小型で安価な半導体レーザーを光源として利用することが必要になってくる。記録波長は記録材料との設計で組合せが可能であり、特定の波長ではかなり高出力の半導体レーザーも開発されている。しかし、その他に、ホログラム記録再生の観点から次のような2つのマージンが挙げられる。

(1) 波長シフトマージン：記録波長から発振波長がシフトしたレーザーによる再生特性。半導体レーザーは、素子ごとに発振波長のバラツキが大きいという問題がある。特に、記録時のドライブ装置

と再生時のドライブ装置の間で波長が異なる事が想定されるため、メディアの装置互換性を実現する上では、この波長シフトマージンが広い事が望まれる。

(2) 波長スペクトラムマージン：マルチモード発振したレーザーによる再生特性。半導体レーザーに外部共振器を付加してシングルモード化する等して単一波長にし、スペクトル線幅を狭くしてコヒーレント長を長くしたレーザーが、ホログラムの記録再生では望ましいが、一般的には、半導体レーザーは素子端面間の共振器長が短いため、マルチモード発振しており、コヒーレント長が極めて短いという問題がある。しかし、このようなマルチモード発振したレーザーでも、少なくともホログラムの再生を可能にすることが、将来的に安価なシステムを実現する上で、極めて重要な技術課題である。

以上の観点から、2種類の波長マージンを実験により評価した。

4.6.1 波長シフトマージン

コリニア方式における波長シフトマージンについて、記録時と再生時の波長を変化させた実験により評価を行なった。S-VRD に組込まれているレーザーは固体レーザーであるため波長が 532nm に固定されており、記録された波長と異なる波長での再生実験を行なうように改造するのは難しい。そのため、波長が可変できる色素レーザーを用い、同一の光学定盤上にコリニア方式の記録再生光学系を構築して、波長シフトマージンの評価実験を行なった。

実験に使用した波長可変レーザーと色素、および、光学定盤上に展開したコリニア方式の記録再生光学系の概観を図 6 5 に示す。色素を選定するにあたっては、波長変化幅が大きく設定できて、かつ、記録媒体に感度を持つ波長でレーザー発振が行なえる事が必要である。その結果、記録の際のレーザー光の発振波長は 495nm とした。この波長でコリニア方式によるページデータを記録したあと、長波長側に波長を変化させてコリニア方式による再生を行なった。

波長を変化させながら再生する際に、再生の繰り返し照射により再生画像を劣化させる可能性がある。このため、記録再生は常に新しい位置で、まず 495nm の記録を行ない、波長を変化させて再生するという実験を繰り返した。得られた再生画像のうち代表的なものを図 6 6 に示す。また、再生画像から回折効率を求め、再生画像の波長依存性を求めた結果を図 6 7 に示す。比較のため、同じ記録媒体厚み (500 μ m) における二光束干渉法のデータを参考として挿入した[18]。

50%の相対回折効率で比較すると、コリニア方式では二光束干渉法より 3 倍以上広い波長マージンが得られていることが明らかとなった。更に、Symbol Error で評価した場合、図 6 8 に示すように再生波長が記録波長より 2.7nm ブレても再生ページの Symbol Error は 100 個以内に収まっていた。実験装置の関係上、記録波長より短い波長側の評価を行なうことはできなかったが、短波長側も同様の結果が得られると仮定すれば、記録波長 497.7nm に対して再生可能な波長範囲、すなわち、波長シフトマージンは ± 2.7 nm 程度と推定される。

以上の評価結果から、コリニア方式においては広い波長シフトマージンが得られることが分かった。

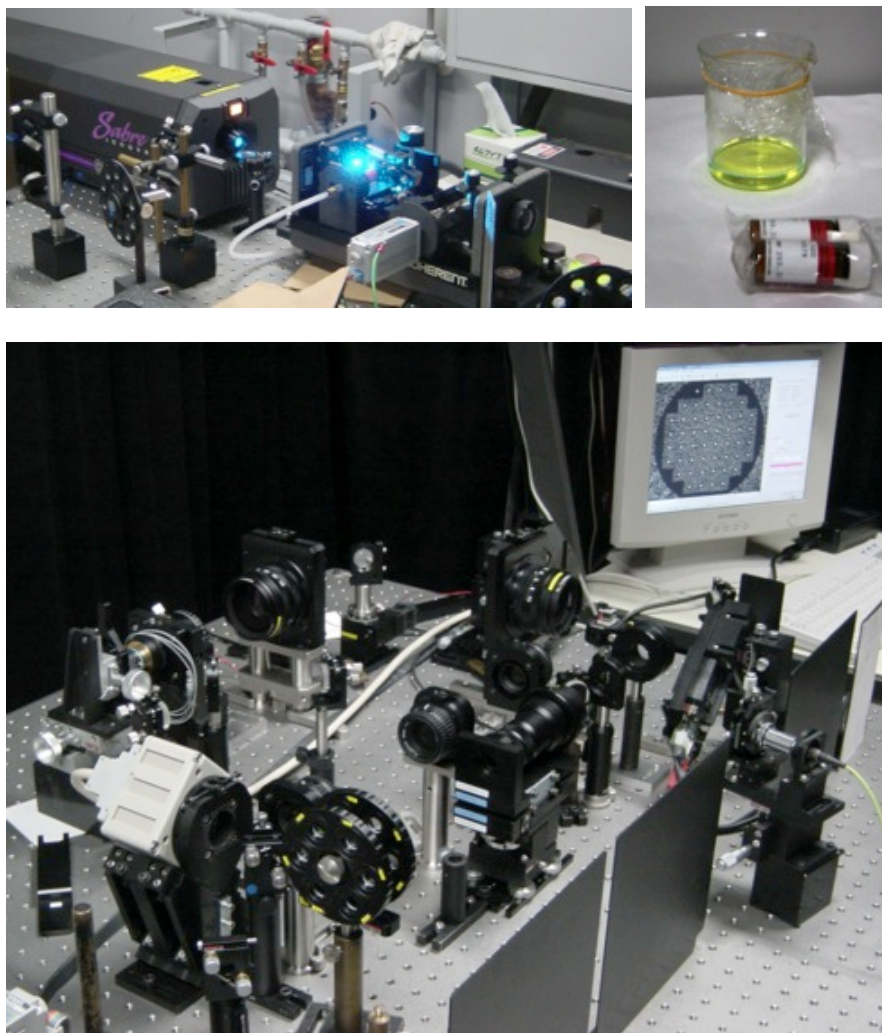


図 65 色素レーザーを用いたコリニア方式による波長マージン評価実験系の概観

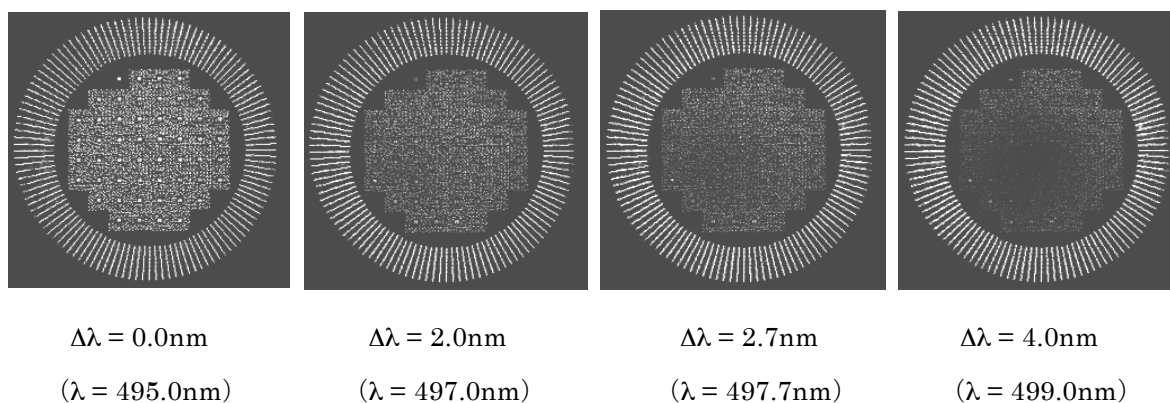


図 66 記録時と再生時の波長変化による再生像の観察結果

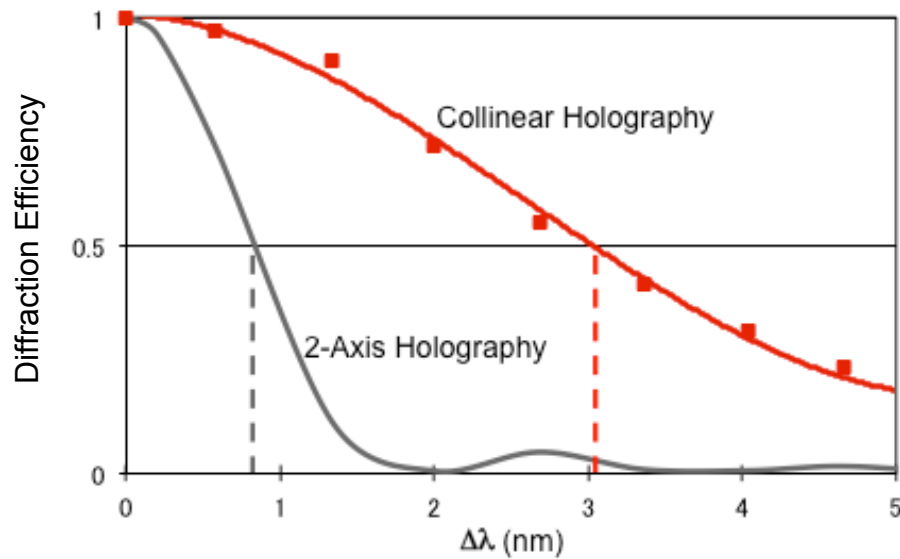


図 67 回折効率による波長マージン評価結果と二光束干渉法の理論値との比較

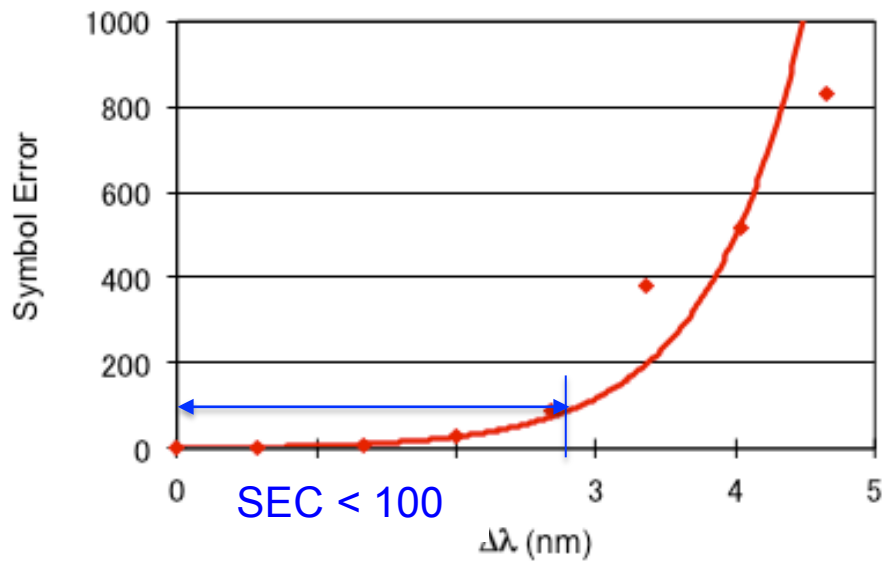


図 68 Symbol Error による波長マージン評価結果

4.6.2 波長スペクトラムマージン

波長スペクトラムマージンを評価するために、実際に Blu-ray など採用されている青色半導体レーザー（波長 405nm 近辺）を用いて、コリニア方式におけるページデータの再生実験を試みた。実験に用いた青色レーザー対応のコリニア方式記録再生装置（名称：B-VRD）の全体構成斜視図を図 6 9 に示す。この B-VRD を用いた実験装置の光学系は、図 7 0 に模式的に示すような構成になっている。この実験装置の中には、2つの青色レーザー光源が組込まれており、可倒ミラーにより、これらを選

扱えるようになっている。評価の基本となるページデータのホログラム記録には、外部共振器によりシングルモード発振させたレーザー（実測による波長 407.9nm）を用いた[5]。

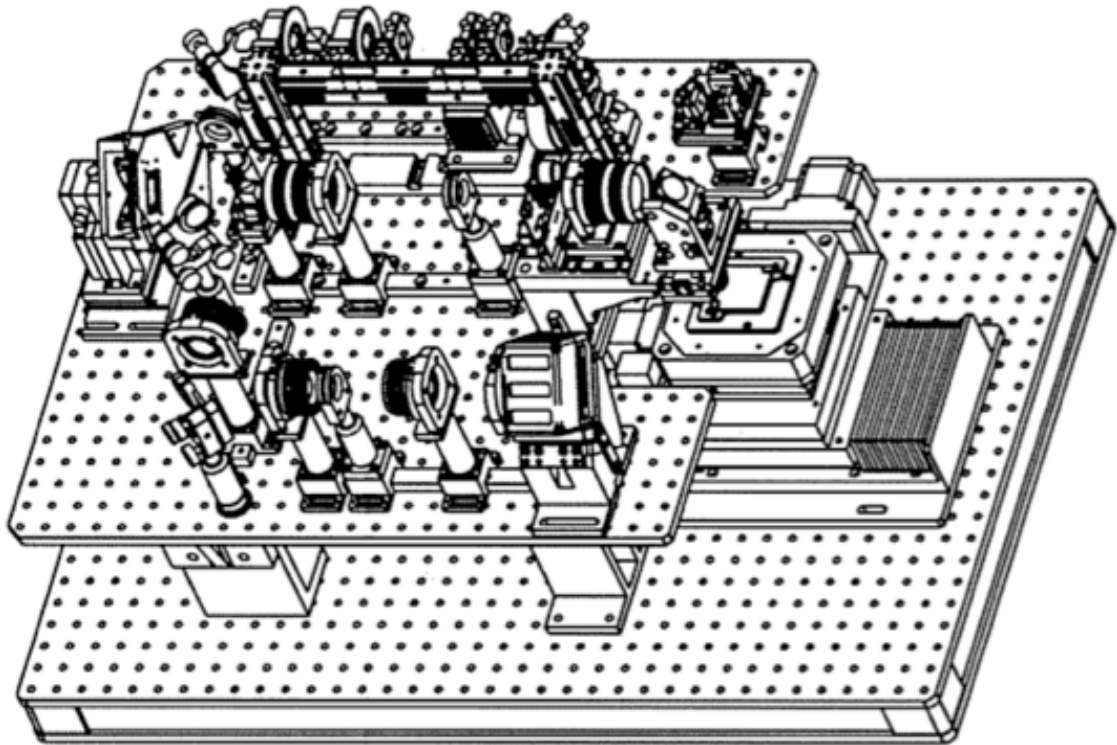


図 69 青色レーザー対応コリニア方式記録再生装置（B-VRD）の全体構成斜視図

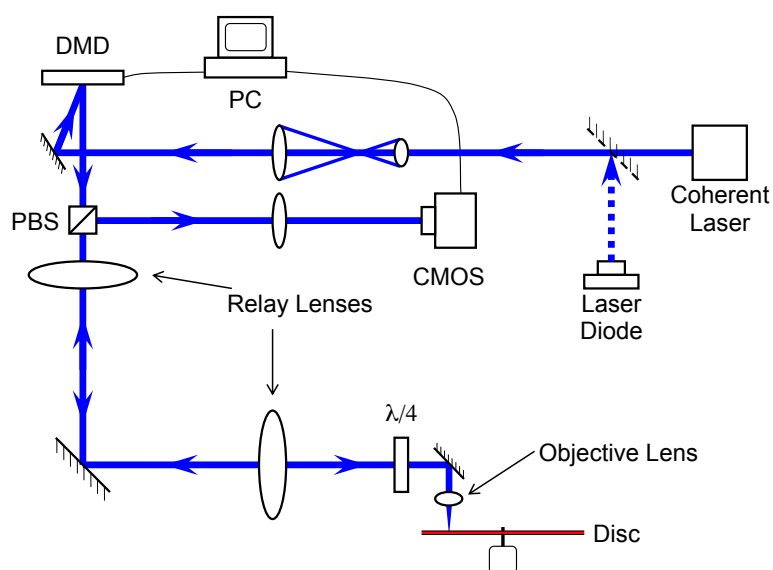
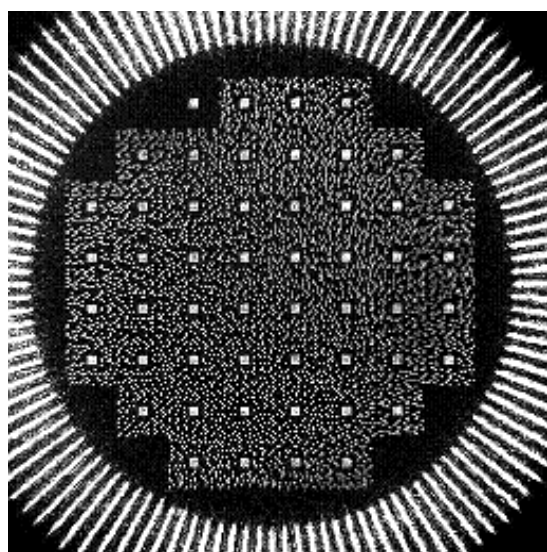
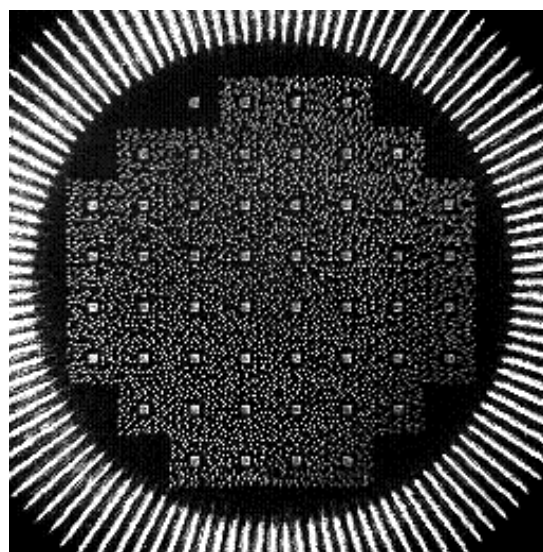


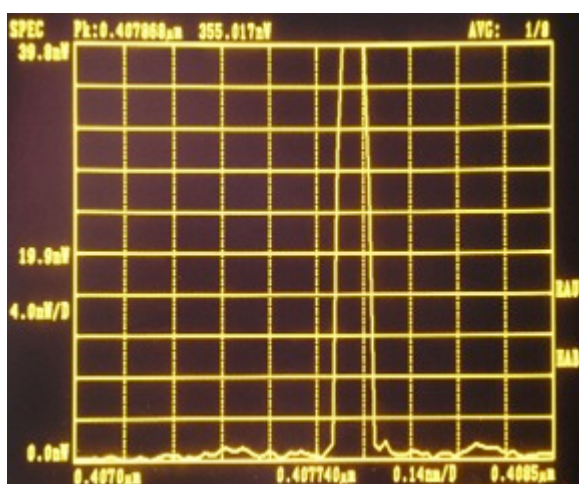
図 70 半導体レーザー光源を組み込んだ B-VRD システムの光学系構成図



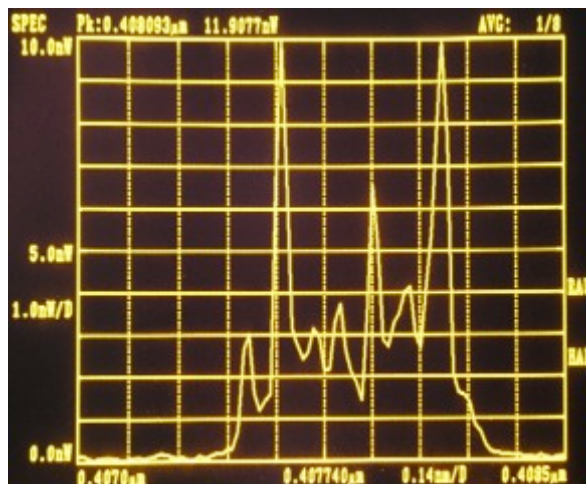
$$\text{BER} = 2.45 \times 10^{-3}$$



$$\text{BER} = 4.70 \times 10^{-3}$$



(a) コヒーレントなレーザー光源



(b) 未制御の半導体レーザー光源

図 71 コヒーレンシーの異なる光源で再生されたページデータと光源のスペクトラム

再生の実験では、記録時に使用したのと同じシングルモード発振させたコヒーレンシーの高いレーザーを用いて、比較用のページデータを読み込んだ。また、コヒーレンスの低い定電流電源だけで駆動した半導体レーザー（日亜化学社製の半導体レーザー（波長スペック～408nm）を、フィードバックの無い状態で駆動し、同じページデータを読み込んだ。読み込まれたそれぞれの再生ページデータ画像と、エラー解析した結果を図71の上段に示す。

再生されたページデータのエラーレート（BERはSymbol Error Rateと同じ）を評価したところ、両方とも 10^{-3} オーダーの低い値が得られた。一方、それぞれの半導体レーザーの発振波長を光スペク

トラムアナライザーで測定したところ、図 7 1 の下段に示すような波長スペクトラムとなっていた。スペクトラムアナライザーの画面表示は、横軸の一目盛りが 0.14nm/Div. となっており、両方の測定画面とも同じ、約 $407.0\text{nm} \sim 408.5\text{nm}$ が表示されている。外部共振器によりシングルモード発振されたレーザーでは、波長 407.9nm の線幅の狭い単一スペクトラムとなっているのに対し、電流駆動だけの半導体レーザーではスペクトラムに多数のピークが観察され、明らかにマルチモード発振している様子がうかがえる。マルチモード発振の波長スペクトラムの幅は、画面表示から、およそ 0.9nm 程度の広がりとなっている。

以上の結果から、発振スペクトラムが複数存在し、マルチモード発振している半導体レーザーを用いた再生においても、コリニア方式では、ビットエラーレートは実用可能な低い値のまま再生が可能である事が実験によって実証され、広い波長スペクトラムマージンを有する事が明らかとなった。

4.6.3 コヒーレント長マージンの考察

コリニア方式光学系では、情報光と参照光が同じ空間光変調器面上で生成され光路差を持たない、いわゆるコモンパスの記録再生光学系となっているため、基本的には、コヒーレント長への要求は極めて小さいと考えられる。しかし、図 7 2 に示すような DMD を用いる独特な光学系の構成の場合には、ページ面内で光路差が生じてしまうことが懸念される。そのため、コリニアホログラフィーにおいても、コヒーレント長にある程度のマージンが必要となると考えられる。図の配置から、必要となるコヒーレント長は以下の式で計算される。

$$L = D \sin \alpha \quad (9)$$

ここで、 L はコヒーレント長、 D はデータページの直径、そして α は DMD へ入射するレーザー光と出射されるレーザー光の角度である。S-VRD における実験系の数値を用いると、 $D = 4.4\text{mm}$ 、 $\alpha = 24^\circ$ であるため、単純には、 $L = 1.8\text{mm}$ のコヒーレント長は必要であると推測する事ができる。

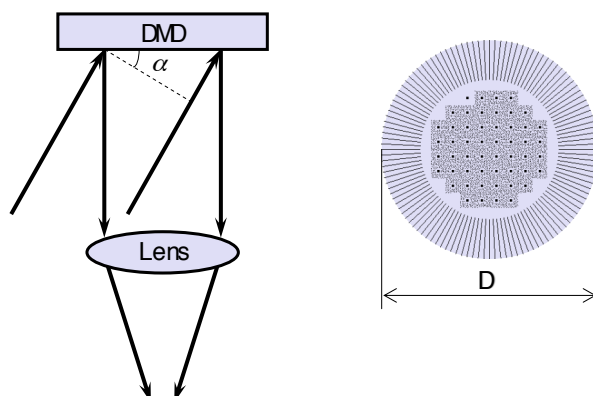


図 72 DMD を用いたコリニアホログラフィーにおけるコヒーレント長の必要量

これとは別に、上記のマルチモード発振した半導体レーザーでの実際の再生実験から、再生に用いたレーザー光のコヒーレント長： τ は、以下のようにして求められる。

$$\tau \sim c/\Delta\nu \quad (10)$$

ここで、

$$\Delta\nu \sim (c/\lambda^2)\Delta\lambda \quad (11)$$

である。そこで、スペクトラムの計測結果から、 $\Delta\lambda=0.9\text{nm}$ を代入してコヒーレント長を概算で求めてみると、 $\tau \sim 180\mu\text{m}$ (約 0.18mm) となった。すなわち、半導体レーザーを用いたコリニア方式の再生実験においては、コヒーレント長が 0.2mm 程度のマルチモード発振したレーザー光を用いているにも関わらず、エラーの無い良好な画像品質の再生像が得られていたことになる。

以上の実験事実と、別の実験においても Q-スイッチレーザー（これも線幅の極めて狭いマルチモードの 10ns のパルス光）により良好な SNR の記録再生が行なえていることを勘案すると、コリニア歩数式においては、より近接した参照光ピクセルと情報光ピクセルが効果的に干渉し合っており、また、DMD の 4 輝点の効果も相まって、極めて短いコヒーレント長でも記録再生が可能であると推測される。

4.7 超小型コリニア光学ヘッドの実現化検討

以上の結果から、半導体レーザーを用いたコリニアホログラフィーの構想がより明確となった。そこで、半導体レーザーを用いたモノリシック記録再生光学ヘッドのモックアップを試作開発し、将来ビジョンと設計コンセプトをより明確にする検討を行なった。その概要を、参考までに以下に示す。

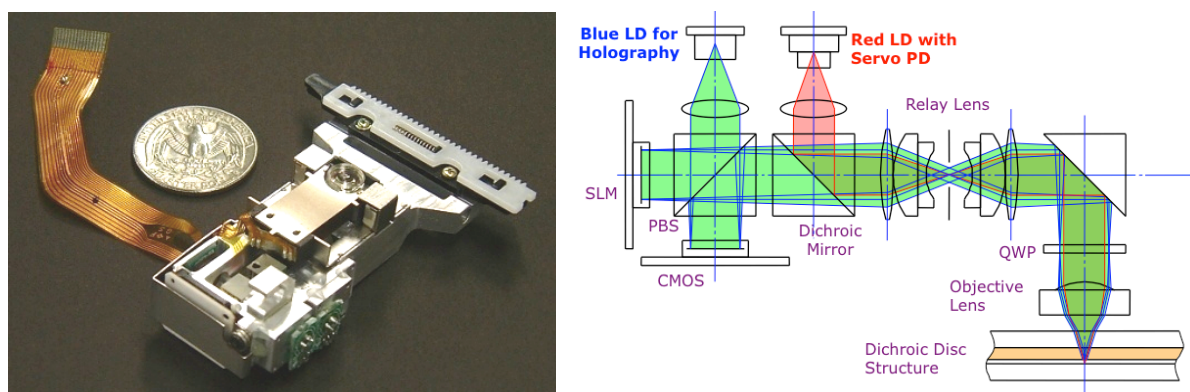


図 73 コリニアホログラフィー記録再生光学ヘッド（モックアップ）

図 7 3（左）は、試作開発したモックアップの外観である。サイズを比較するために、米国の 10 セントコインを置いて撮影した。同図（右）は構想段階の光学ヘッド内部の光学系の構成模式図である。図 7 4 は、実際に半導体レーザーを発光させたときの様子である。このモックアップ検討では、リレ

ーレンズだけは、予算の関係で挿入可能なものを用意できなかったが、その他のコンポーネントは、敢えて、検討した時期に入手可能であった実デバイスを組み込み、実現可能性をリアルに検討できるように組上げた。特に、対物レンズは、 $NA=0.4$ と小さいが、コリニアホログラフィー用に専用設計して試作した、プラスチックモールドの非球面レンズ（2枚組み）で構成されている。

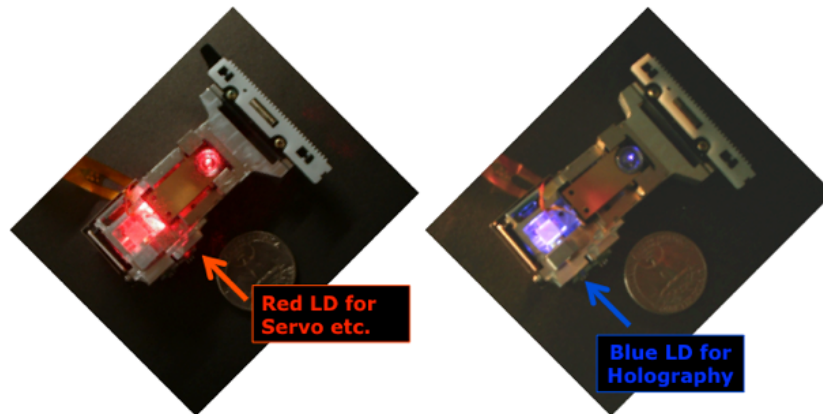


図 74 赤色および青色の半導体レーザー光源を発光させたときの光ヘッド

コンポーネントの開発は日進月歩で進化しているため、今後、更なる小型化と高性能化および低コスト化が進むことが期待できる。そのため、将来的にはそれらの融合で、コリニアホログラフィー用超小型光ヘッドの製品化設計は可能となるであろうとの展望を得ることができた。更に、アーカイブストレージの分野で利用されるようになった場合には、図 7 5 に示すように、光学系を HOE: Holographic Optical Element で更にシンプルにした、コリニアホログラフィー用モノリシク光学ヘッドも実現されるであろうと予想している。

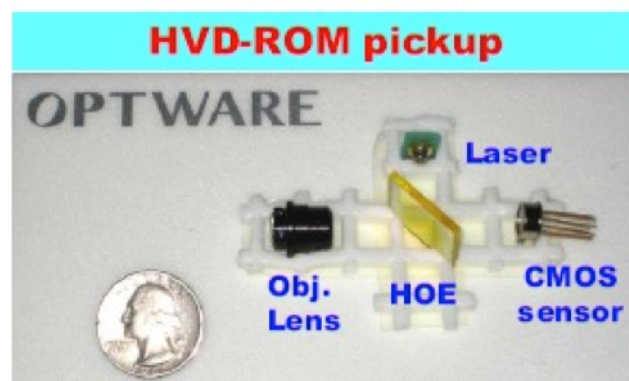


図 75 HOEを用いたコリニアホログラフィー用モノリシク光学ヘッド（構想図）

4.8 まとめ

実用的なホログラフィック光ディスクドライブシステムを構築するために、コリニア方式の各種のシステムマージンを評価した。ページデータを記録再生する位置を正確に定めるために用いるフォーカスおよびトラッキングサーボのマージンは、DVDのデトラック規格値より6倍以上のマージンがあることが分かった。また、フォーカスサーボによりディスクの面ぶれに対物レンズが追従して移動した際に、対物レンズとSLMイメージの再結像位置との距離の許容値、いわゆるイメージプレーンマージンは $\pm 200\mu\text{m}$ 程度、記録媒体が傾いた際のチルトマージンは0.18度程度であった。これらの評価結果により、光ディスクで一般的に用いられている光サーボ技術を応用することで、コリニア方式では実用化に十分なシステムマージンが確保できることが明らかとなった。さらに、記録再生時の波長シフトに関係する波長マージンを評価したところ、約3nmの波長マージンを有することが確認され、半導体レーザーを用いたコリニア方式光ピックアップを実現することが、原理的には可能であることが示された。実際に、青色半導体レーザーを用いた再生実験を行なったところ、マルチモード発振したレーザー光を用いた場合でも、コリニア方式によるページデータの再生が可能であることが示された。

以上により、実用的な仕様を前提とした、コリニア方式によるホログラフィック光ディスクドライブシステムの設計指針が、明確に構築された。

参考文献

- [1] H. H. Hopkins, "Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs," J. Opt. Soc. Am., **69**, 4-24 (1979).
- [2] 米澤 実, "HD DVD システムの機構・サーボ技術," 東芝レビュー, Vol.60, No.1, 21-24 (2005).
- [3] Takuma Yanagisawa and Takayuki Nomoto, "Reproducing Margin Simulation of Next Generation Optical Disk System," PIONEER R&D, Vol.12, No.2, 3-12 (2000).
- [4] F. Yokogawa, S. Miyanabe, M. Ogasawara, H. Kuribayashi, Y. Tomita and K. Yamamoto, "Read/Write Technology for 50 GB/layer at 100 Mbps," Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 819 (2000).
- [5] T. Tanaka, K. Takahashi, K. Watanabe, D. Samuels and M. Takaya, Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2004, 311-313 (Monterey, California, USA, 2004).

第5章

データストレージシステム：HVD

5.1 はじめに

コリニア方式の特徴は、ホログラムの記録再生をたった一つの対物レンズを用いて行える事と、記録媒体が反射膜付構造である事により、光学系をディスク片面側にコンパクトに構成することができる点にある。更に、記録媒体の反射膜にプリフォーマットなどによりアドレス情報を付加すれば、CDやDVDで利用されている光サーボ技術をホログラム技術と融合させることが可能になり、従来のホログラフィック記録再生では必要不可欠であった除振台が不要になるばかりでなく、回転する光ディスクの偏心や面振れにも追従して任意のアドレスに高精度に干渉縞を形成することも可能になる。

この章では、実用的なシステムを作り上げる上で必要な要素技術開発について触れるとともに、ホログラフィック光ディスク：HVD（Holographic Versatile Disc）の記録媒体構造について述べる。また、コリニア方式の特徴を全て融合して試作開発されたプロトタイプドライブシステム：ES-1（Engineering Sample #1）のシステム構成と記録再生シーケンスについて概説する。また、このES-1とHVDを用いて、300 rpmで連続回転させながらHVD全面にわたりOn the Fly記録再生に成功した。実験結果を、ディスク全面のエラーレート解析結果によって示す。

5.2 ホログラフィック光ディスク：HVDの構造

デジタル体積ホログラフィーを超高速・大容量のホログラフィック光ディスクデータストレージシステムとして実用化するためには、残された幾つかの技術課題にブレークスルーを与える必要がある。その一つが、記録媒体の構造である。S-VRDに採用した二波長光学系の構成により、光サーボに伴う

記録材料の感光の問題は解決済みであるが、コリニアシフト多重記録再生を実現するためには、第4章のトラッキングマージンで示したように、記録再生の位置再現性を $\pm 50\text{nm}$ 以下で実現しなければならない。そのためには、プリフォーマット構造を記録媒体に施し、それを基準として高精度の光サーボを作動させることが必須である。しかし、反射膜に形成したプリフォーマットは反射型位相回折格子のように働いてしまい、ホログラム記録再生の際に散乱ノイズを発生させてページデータの画像品質を著しく劣化させてしまう。そこで、この技術課題を解決するために、記録メディアに波長選択反射膜を挿入し、波長により機能を分離する方法を検討した。

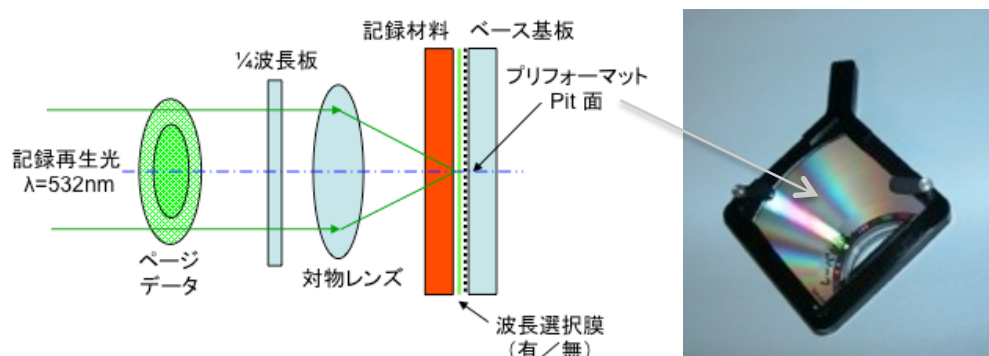


図 76 波長選択反射膜構造によるノイズ低減実証実験用光学配置

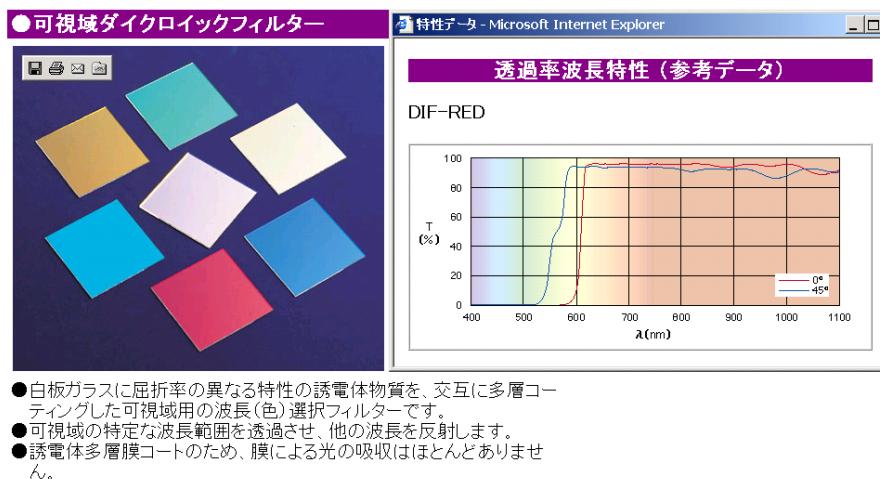


図 77 誘電体多層膜フィルターの透過率波長特性

原理実証実験用の光学配置を図76に模式的に示す。実験光学系としてはS-VRDを用いる。フォトポリマーを透明なガラスだけでサンドイッチした記録材料を作成し、図の右側の写真に示すように、記録材料の裏面側にCDのプリフォーマットPit面（反射膜面）が来るようにサンプルホルダーに配置した。また、実験に用いる波長選択素子として、薄い厚みのダイクロイックミラー（緑波長のみ反

射)を用意した。対物レンズの入射角度 $\pm 45^\circ$ まで緑色と赤色の波長を分離できそうな、シグマ光機製の DIF-50S-RED を選定した。カタログに記載されていた透過率波長特性は図 7 7 の通りである。記録材料と CD の間に、上記の薄いダイクロイックミラーを中間層として挿入した場合と、無い場合のサンプルセットを用いて、S-VRD によるコリニア方式のホログラムの記録再生を行なった。

まず、赤色レーザーを用いたフォーカスサーボを動作させたところ、どちらのサンプルセットにおいても、再現性よく、裏面の CD のプリフォーマット Pit 面にフォーカスを合わせられることを確認した。その上で、コリニア方式によるホログラムの記録再生を行ない、再生画像を撮影した。その実験結果を図 7 8 に示す。同図で(a)および(c)はダイクロイックミラーが挿入された場合で、同図で(b)および(d)は無い場合の、それぞれの再生像とその拡大画像である。この結果から、波長選択性を持ったダイクロイックミラー中間層は、プリフォーマットされた反射面からのノイズを極めて効果的に除去することが分かった。また、二波長光学系による光サーボも問題無く機能することが確認された。

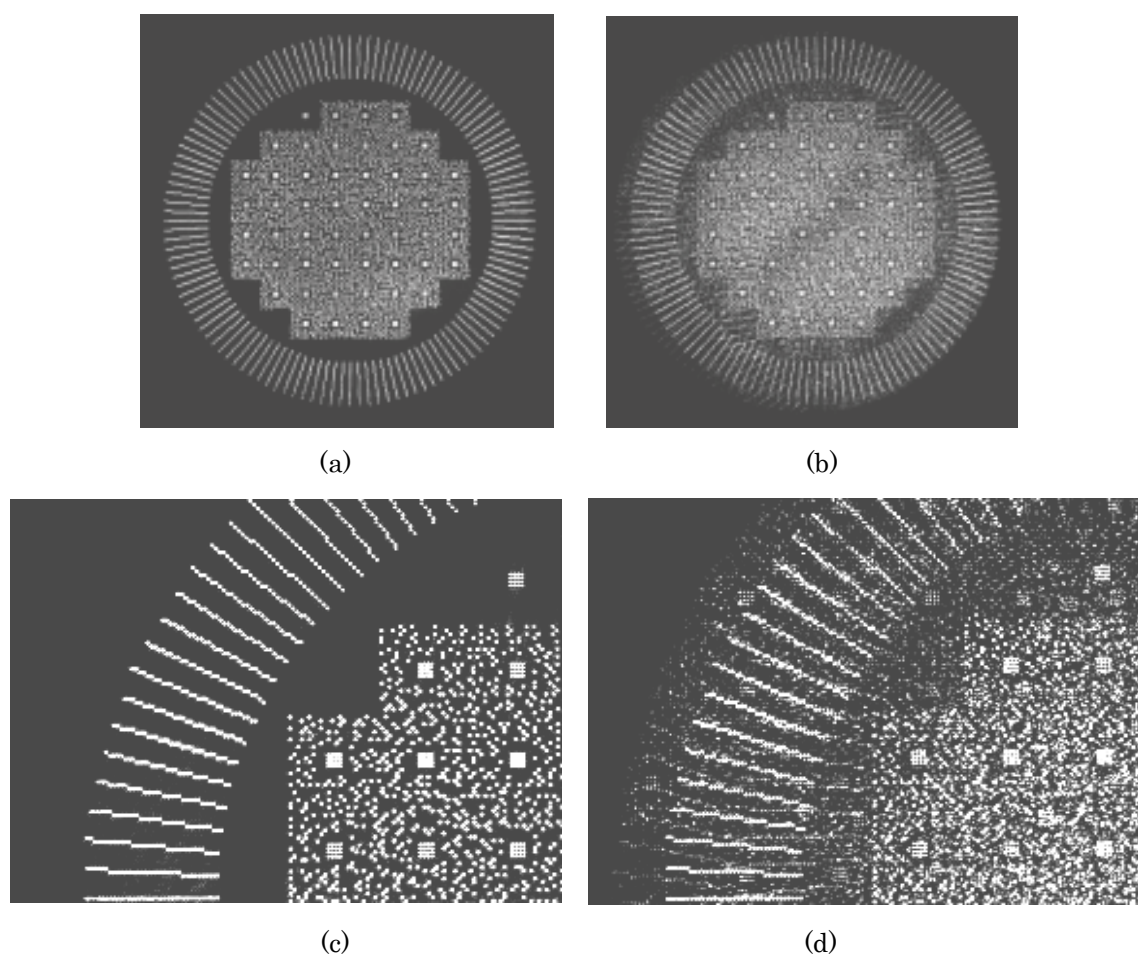


図 78 記録再生された画像：(a) (c) 波長選択性をもったダイクロイックミラー中間層が付けられた場合、(b) (d) ダイクロイックミラー中間層が無い場合。

以上のことから、波長選択反射膜を中間層に配置する方法は、コリニア方式の記録再生信号の品質向上に効果的な記録媒体の構造となるとの有用な知見を得た。この知見を基に、ホログラフィック光ディスク：HVD（Holographic Versatile Disc）の基本構造を決定した。図79に、開発されたHVDの断面構造を模式的に示す。Base Substrateはサーボ情報やアドレス情報がプリフォーマットされ、アルミ反射膜がコーティングされた厚み1.1mmの光ディスク基板であり、その上に0.1mmのGap層が付けられた後、波長選択反射膜（Dichroic Mirror Layer）が誘電体多層膜コーティングにより形成されている。これは、傷がつかないように表面コートまで施したBlu-rayディスクの断面構造とほぼ同じである。これを下面のプリフォーマット基板とし、もう一枚は、外側の一面だけに反射防止コーティングを施した厚み0.6mmの透明な基板を用意する。プリフォーマット基板と透明基板の間に、記録材料であるフォトポリマーを厚み0.6mmでサンドイッチしてHVDは出来上がる。

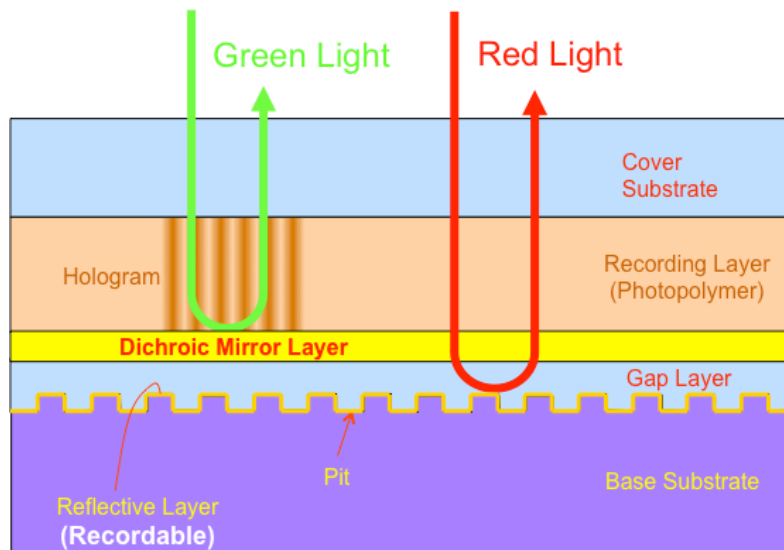


図 79 波長選択反射膜付きホログラフィック光ディスクの断面構造

以上のように、感光性・非感光性の同軸型二波長の光学系を構成し、ホログラム記録層とプリフォーマット層を波長で分離する構造を採用することで、図80に示すように、ページデータの記録再生と光サーボやアドレスの読み出しを物理的に分離することが可能となる。これにより、アドレスのサーチなどの動作中にレーザー光照射によって記録媒体を感光劣化させる問題を解決すると共に、プリフォーマット層からのホログラム画像へ散乱ノイズが混入する問題も解決し、ランダムアクセスが可能でかつ高品質なホログラム記録再生が可能なホログラフィック光ディスクデータストレージシステムが実現可能となる。

なお、プリフォーマット層とホログラム記録層との機能は完全に分離されているため、プリフォーマット層の反射膜としては追記型DVD-Rに用いられているような有機色素や書き換え型DVD-RWの

相変化材などをコーティングすることも想定している。このようなプリフォーマット層をメタデータ層と呼び、高出力の赤色半導体レーザーを用いて Bit by Bit で情報の追記や書き換えが可能である。記録されたホログラム情報は **WORM** となり書き換え不可能なアーカイブ用途に用いられるが、メタデータ層は。そのため、検索履歴情報やディレクトリ情報などのほか、アプリケーションに応じた各種システムコントロール情報などを記録して、ホログラム情報と連携した使い勝手の良いオペレーションを提供することなどの利用が可能である。

HVD の直径は 120mm となっており、外径は CD/DVD/Blu-ray と同じである。体積的な記録を行なうため、トータル厚みは、これらの 2 倍の 2.4mm となっている。DVD-R と並べて置いた HVD の外観写真を図 8 1 に示す。

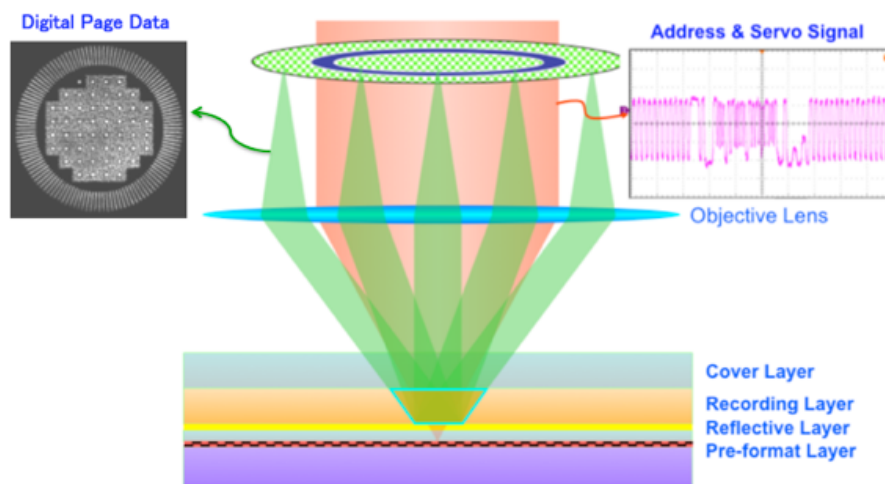


図 80 二波長光学系構成によるページデータと光サーボ情との物理的な分離



図 81 コリニア方式ホログラフィック光ディスク HVD と既存の光ディスクの外観

5.3 コリニア方式ドライブシステム：ES-1

コリニア方式ドライブシステム：ES-1（Engineering Sample #1）を試作開発した。図82は、システム全体概観、HVDカートリッジ挿入の様子、筐体カバーを外した内部、およびローディングメカニズムも外した内部の光学系構成の概観写真である。

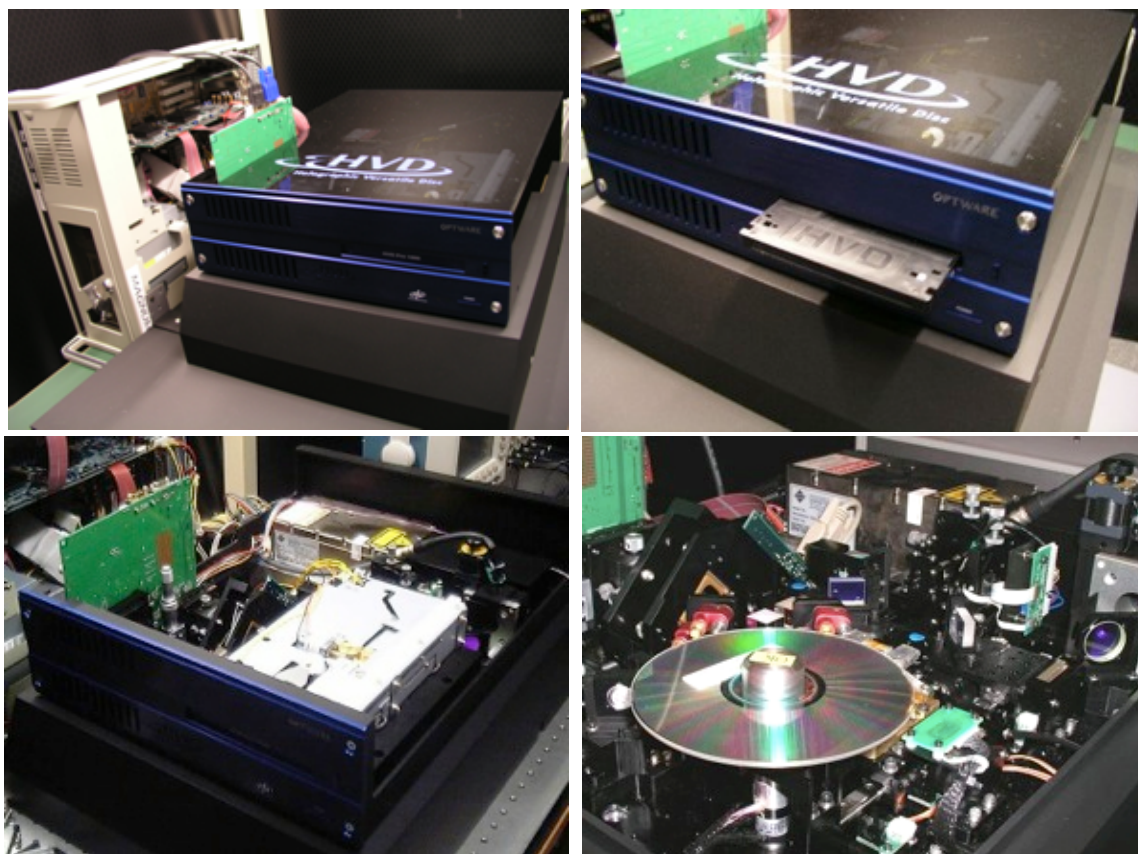


図 82 コリニア方式ドライブシステム：ES-1（Engineering Sample #1）概観写真

このシステムは、回転する HVD ディスクへ On the Fly でページデータを連続記録再生する、世界で初めてのコリニア方式ホログラフィック光ディスクデータストレージシステムのプロトタイプドライブである。各種のホログラム記録材料が研究開発されているが、その中でもアーカイブストレージ用途では、記録完了後に書き換えが不可能なフォトポリマー材料が有力候補として期待されている。フォトポリマーは記録再生光強度に対して閾値を持たないフォトンモードで反応する。このため、環境光の中にそのような波長成分があると、時間とともに積分的に感光し始めてしまい、記録特性が著しく劣化してしまう。このため、製品化の際には、記録ディスクである HVD は写真に一部示されているような遮光カートリッジに納められる。ES-1 ユニット内部のコンポーネントの配置と、光学系の構成を、それぞれ図83と図84に模式的に示す。

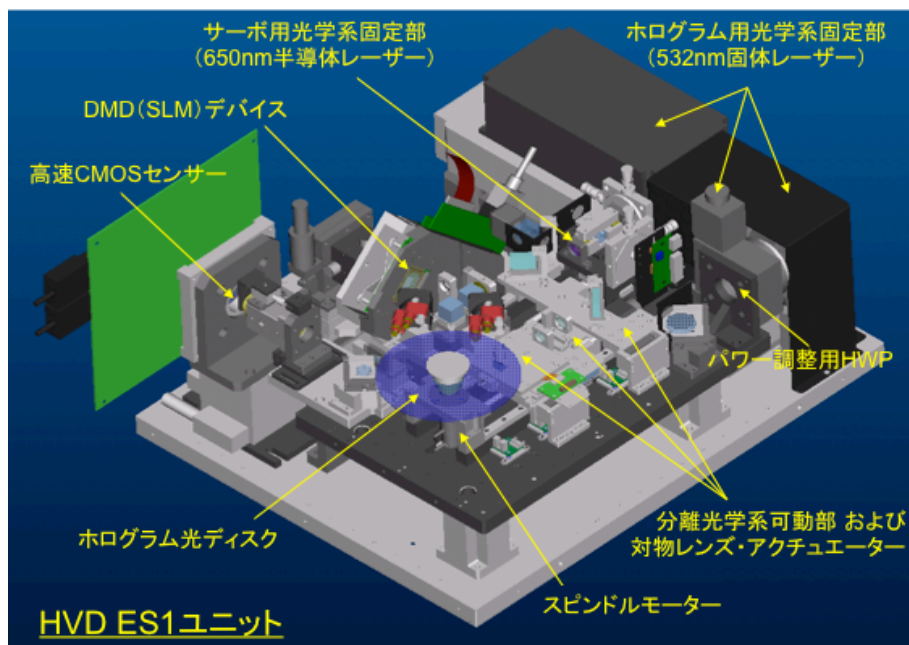


図 83 ES-1 ユニット内部のコンポーネントの配置と、光学系の構成

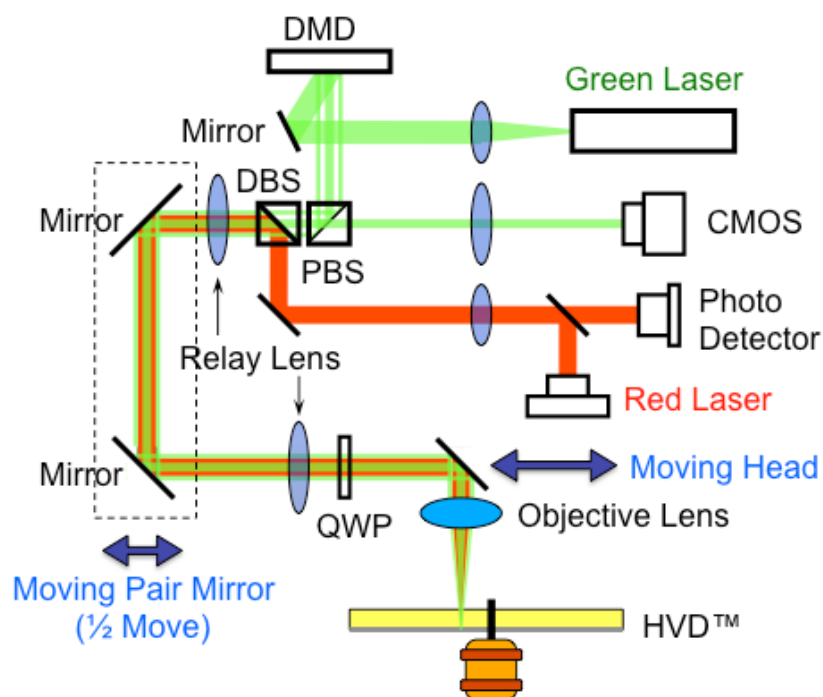


図 84 ES-1 ユニット内部の光学系の構成

前述のとおり、HVD は波長選択反射膜付き光ディスク構造を採用しており、ホログラムの記録および再生には波長 532nm の Q スイッチ固体レーザー（Green Laser）を用い、フォーカスおよびトラッ

キングサーボとプリフォーマットされたアドレスピットの読み出しには、記録材料であるフォトポリマーが感度の無い波長 650nm の半導体レーザー（Red Laser）を用いる、二波長光学系で構成されている。この2つの波長のレーザー光は、ダイクロイックビームスプリッター（DBS）で同じ光路となり、同一の対物レンズ（Objective Lens）に入射される。この対物レンズは、本システム専用に新規開発されたもので、赤色レーザーは HVD のプリフォーマット面に付けられたアルミ反射膜(Reflective Layer)に焦点が合い、緑色レーザーは 100 μm 手前の波長選択反射膜に焦点が合うように設計されている[1]。ホログラム記録再生用の緑色レーザーにおける開口数は $\text{NA}=0.5$ である。

ES-1 では、HVD にプリフォーマットされたアドレスを基準にして、ディスクの内周から外周まで高速なランダムアクセスを実現するために、分離光学系構造を採用し、対物レンズを駆動するフォーカス&トラッキング用の2軸アクチュエーター部を可動にした。リレーレンズ（Relay Lens）による 4f 光学系と可動部の 1/2 だけ移動する2枚のミラー（Moving Pair Mirror）の構成により、DMD で表示されたページデータ画像は常に対物レンズの入射瞳位置に再結像されるように制御される。これにより、可動部がディスクの内周から外周まで移動しても、光学距離は一定に保たれる。コリニア方式による二波長光学系とアクチュエーター主要部の構成を、図 8 5 に模式的に示す。

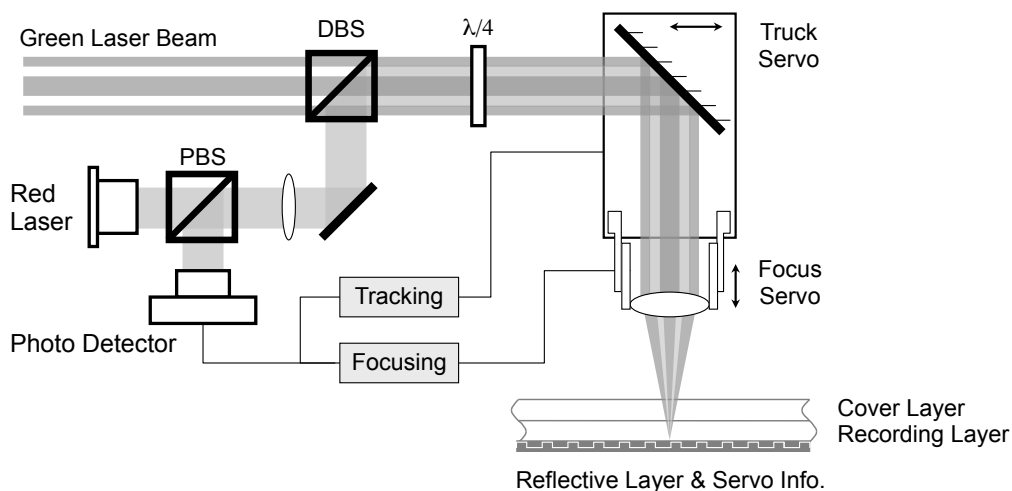


図 85 コリニア方式における二波長光学系とアクチュエーター部の模式図

二つの波長のレーザー光束は、同一の対物レンズを通して記録媒体中へ集光されるため、光サーボ用の赤色レーザーで対物レンズと記録媒体の位置をナノオーダーでコントロールしておけば、ダイナミックに変動する記録媒体へも緑色レーザーを正確に照射でき、再現性の良い高精度な干渉縞の記録再生が可能となる。この時、参照光と情報光を表示したページデータが対物レンズの瞳面の面内で移動すると、見かけ上対物レンズがチルトしたように個々のピクセルからの光が対物レンズ通過後に本来の進行方向の角度からずれて集光してしまう。そのため、2軸サーボアクチュエーターはフォーカ

ス方向には対物レンズのみが平行移動し、トラッキング方向には光ビームを90度に立上げる45度ミラーも一緒に抱えて移動する機構を採用している。このように、分離可動型の光学系の採用と、対物レンズを2次元的に制御させるアクチュエーターと光サーボによりディスクとの変位を許容マージン以下となるようにコントロールする技術を導入した。これにより、ホログラフィック記録再生では必須とされた除振台を不要にただけでなく、任意のアドレスに対して高速なランダムアクセスを可能にし、回転するディスクの偏心や面振れにも追従した記録再生が行なえるため、ディスクの可換性と交換性の確保も実現している。

実際にES-1に組込まれたアクチュエーターとその周辺部の写真（実機では、ディスクとアクチュエーターの位置は上下が逆）と、フォーカスおよびトラッキングのオープンループ特性の測定結果を図86に示す。連続回転するHVDの面ぶれと偏心に追従してコリニア方式でのOn the Flyホログラム記録再生を実現するために、1000rpmの回転速度まで対応できる事を設計目標として開発された。

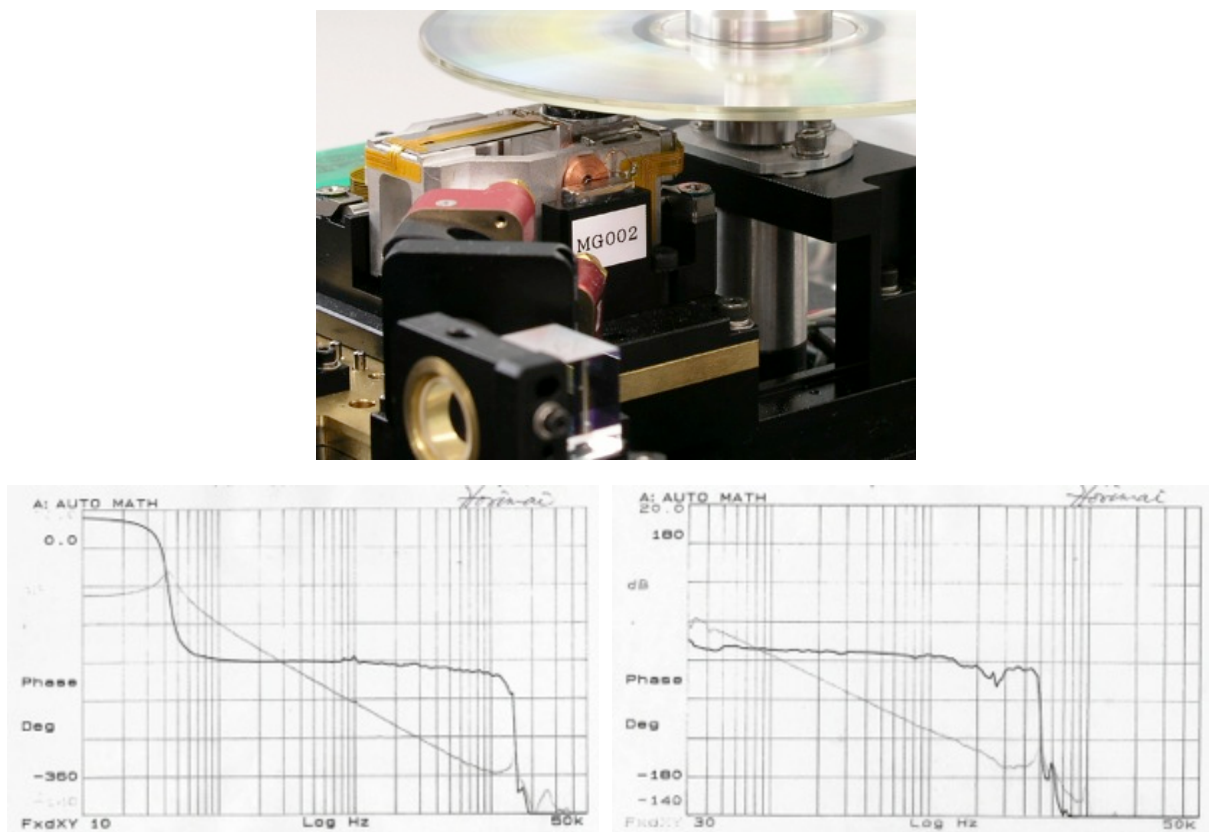


図 86 ES-1 用アクチュエーターとフォーカス&トラッキングのオープンループ特性

ES-1 専用に開発された、いくつかのデバイスの写真を、図87に参考までに示す。図左上は二波長対応の対物レンズ[1]で、これが図右上の二軸アクチュエーターに組み込まれてフォーカスおよびトラッキングサーボが掛けられる。コリニア方式における転送レートはディスクの回転数には依存せず、

ページデータを表示／読み出しするフレームレートによって上限がきまる。そのため、記録には 10,000fps 以上の表示速度を持つ DMD デバイスを用い、再生では 5,000fps の超高速フレームレートで撮影が可能な高感度 CMOS センサーを用い、それぞれデータストレージに適した専用の回路ボードを製作した。また、DMD デバイスに高速でページデータを表示し、CMOS センサーで読み取ったページデータを高速でデコードするために、データページ信号処理も高速化が要求される。図左下は、開発した上述の超高速 CMOS センサーと検出回路、図右下は、開発した高速データページ信号処理ボードの概観写真である。詳細の内容は、本論文では省略する。

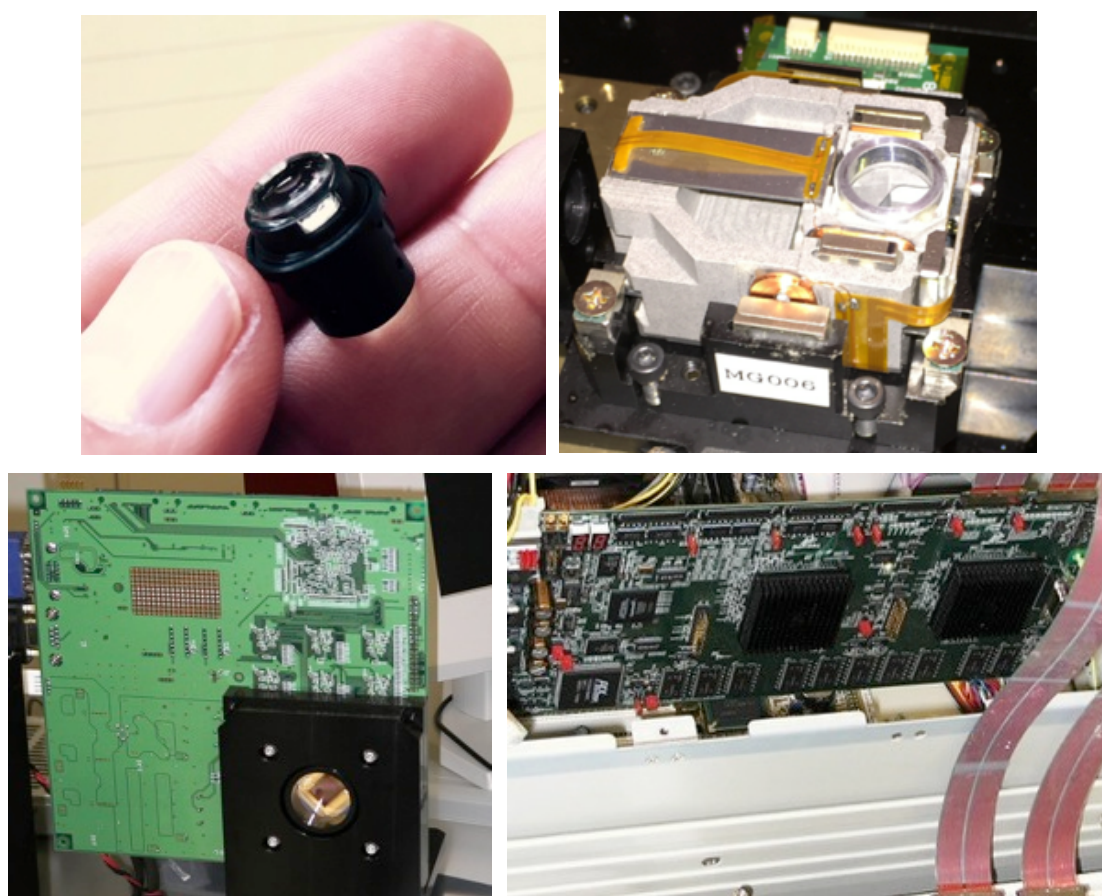


図 87 ES-1 用に専用開発された各種コンポーネントや信号処理ボード

5.4 HVD の物理フォーマットとページデータ記録再生シーケンス

2 軸アクチュエーターによるオプトメカニカルサーボ技術と、二波長光学系と波長選択反射膜構造の採用により、いよいよ HVD のベース基板にプリフォーマットされた物理フォーマット情報を基に、回転する HVD の任意の位置へ高精度に位置決めして、2 次元ページデータを記録再生することが可能な段階となった。

物理フォーマット情報は、光ディスクと同じような微小なプリフォーマットピットの形でディスクの周方向に連続して刻まれている。

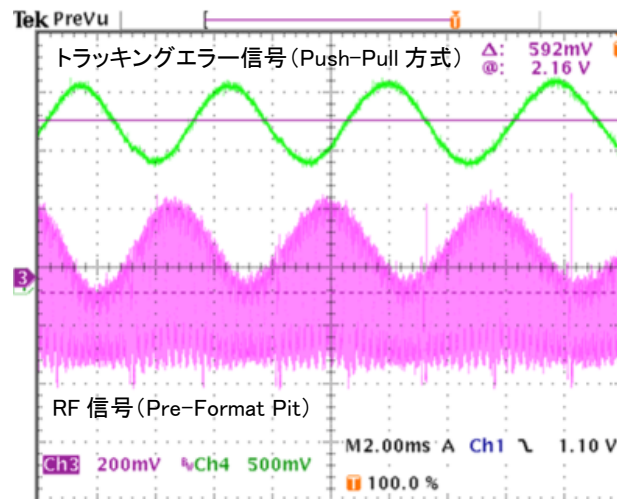


図 88 赤色レーザー（波長 650nm）により検出されたトラッキングエラー信号

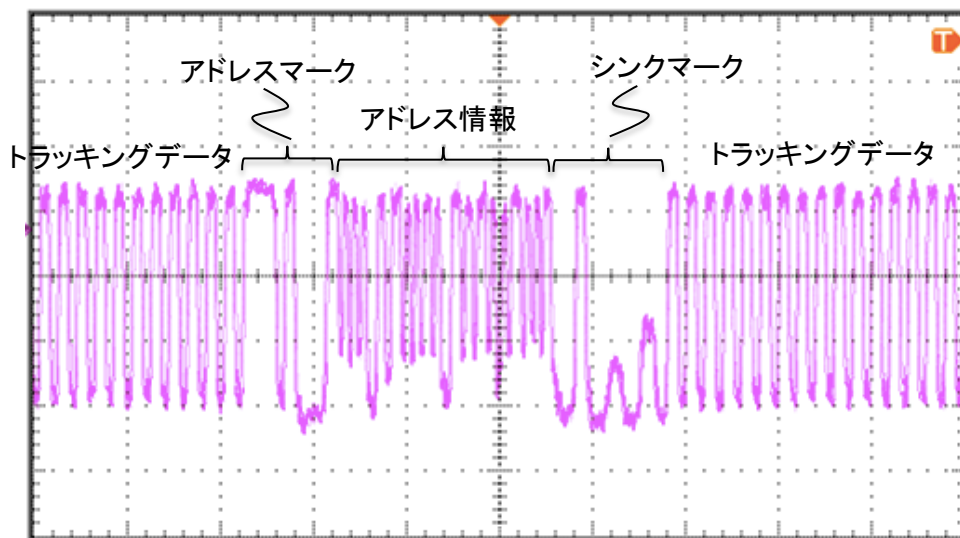


図 89 赤色レーザー（波長 650nm）により再生されたプリフォーマット信号

このプリフォーマットは、ヘッダーとトラッキングデータの2種類が交互に繰り返して形成されており、ヘッダーにはディスクの半径方向のトラック番号と周方向のセクター番号およびこれらのエラー訂正符号（ECC）で構成され、このヘッダー情報と次のヘッダー情報の間は単一のクロック周波数ピットのトラッキングデータで埋め尽くされている。このプリフォーマットピットを、ホログラフィック記録材料に感光性の無い赤色レーザー（波長 650nm）で読み出すことにより、ホログラム記録再

生する位置の情報を得るとともに、フォーカスやトラッキングのためのサーボ信号も得ている。

図 8 8 は、フォーカスサーボだけを掛けて読み出したプリフォーマットからの RF 信号と、Push-Pull 方式[2]によるトラッキングエラー信号の一例である。図 8 9 は、さらにプリフォーマットピットにトラッキングサーボも掛け、時間軸を広げてヘッダー部近傍を拡大して観察したプリフォーマット情報の再生例である。アドレスおよびトラッキングデータは基準クロックに従って刻まれているため、ホログラム記録再生位置は、ディスクの周方向と半径方向に一義的に決めることができる。この位置決め精度は、面内で±25nm 以下と高精度である。

次に、ディスク上へのページデータ記録再生シーケンス（論理フォーマット）について説明する。ベース基板のプリフォーマット層には、ディスク一回転あたり 120 個のヘッダーが刻まれている。ヘッダーとヘッダーの間は、前述のようにトラッキングデータが一定の周波数のピットで埋め尽くされている。このピットからの再生信号をカウントする事で、ディスクから生成された外部クロックとアドレス位置情報をもとに、完全同期の記録再生を実現する。図 9 0 はその概念図である。ディスクは角速度一定（CAV: Constant Angular Velocity）でコントロールされている。実験されたスペックに従い、ここでは回転数を 100rpm で説明する。

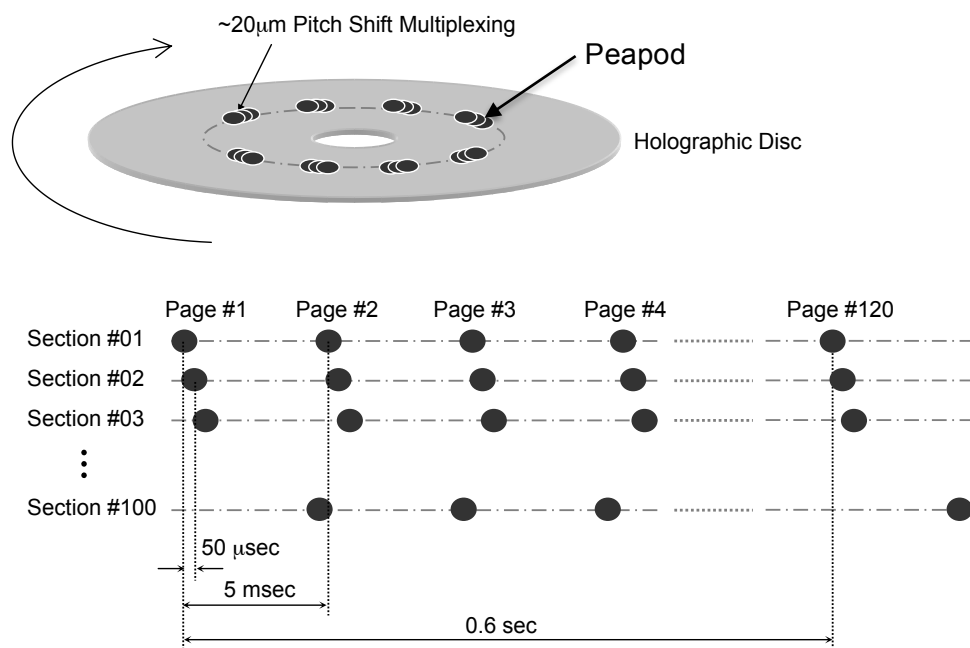


図 90 HVD における記録再生シーケンスの概念図

二次元ページデータはページ内およびページ間のエラー訂正符号を含んで構成されており、1 パルスで記録が行なわれる。ページデータが記録される一つのアログラムのことをページと呼ぶ。従って、このページが記録の最小単位となる。再生も同様に、1 パルスにてページが再生される。

HVD の特徴のひとつでもあるが、ページはディスクの周方向に飛び飛びに記録される。図 9 0 では、説明のために、一周あたり 120 個のページが記録される場合を示している。この一周 120 個のページのデータをまとめて、説明の便宜上、セクションという単位にする。このとき、次のセクションを記録する際には開始タイミングを少し調整することで記録位置を周方向に若干ずらして記録され、その結果、周方向に対してコリニアシフト多重が行われる。同様に、例えば 1 トラック上に 100 セクション=12000 個のページをホログラム記録する場合、ディスクの半径 40mm（中周）あたりでは、周方向へ約 $20\mu\text{m}$ ピッチでのコリニアシフト多重記録が行なわれることになる。同一トラックにおいて、セクション数が増加するとコリニアシフト多重されたホログラム同士が連結して延びていくが、これを Peapod と呼んでいる。

上記のように 100rpm で回転する条件では、記録と再生のフレームレートは 200fps となり、そのため、ページ 1 とページ 2 の記録時間の間隔は 5ms となる。物理的には、隣接するページは回転方向に $50\mu\text{s}$ ごとの時間周期で並んでいるが、再生の際にもプリフォーマットからのクロック情報を基にして、ページを飛び飛びに再生するため、記録時のシーケンス通りにページを読み出すことが可能である。

1 トラック上に形成された幾つかのセクションをまとめて、ここでも説明の便宜上、これをチャプターという単位とする。例えば、1 トラックに 100 セクションを記録したものを 1 チャプターとし、この 1 チャプターもまた、半径方向に所定のシフトピッチでコリニアシフト多重して形成することができる。HVD では、プリフォーマットのトラックピッチが $1.6\mu\text{m}$ であるため、その整数倍で半径方向のシフト量は選択される。そして、このチャプターを幾つかまとめて、ブックという単位にする。これらの各単位のサイズは、アプリケーションによってある程度自由に決められるものであり、最終的にはファイルフォーマットとして規定されるものである。

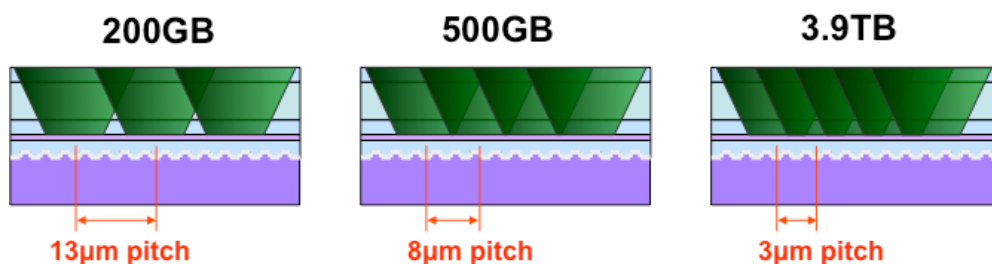


図 91 Selectable Capacity Format の概念図

このように、チャプターあたりのセクション数とブックあたりのチャプター数は、記録媒体の x 方向と y 方向のコリニアシフト多重記録性能を含めて最適化される。HVD フォーマットでは、記録材料の性能に合わせて、これらを選択できるようになっている。例えば、図 9 1 に模式的に示すように、

HVD では記録再生ピッチを変化させるだけで、異なる記憶容量のディスクフォーマットに対応することが可能である。このようなフォーマットを「Selectable Capacity Format」と呼んでいる。そのため、今後、記録材料や SLM および CMOS センサーなどの性能が向上していった際には記憶容量と転送レートを向上させつつ、上位互換だけでなく下位互換も確保することが容易である。これは、アーカイブ用途で 50 年以上のデータ保存を行なおうとする際には、極めて重要な設計思想であると考えている。

以上のような記録再生シーケンスを採用することで、得られるメリットは幾つかあるが、そのうち代表的なものを以下に列記する。

- (1) デバイスのフレームレートに依存せずディスクの回転数を早くできるため、ランダムアクセスを行なう場合のディスクの回転待ち時間を短くでき、データへのランダムアクセスの際のスピード向上が図られる。
- (2) 連続したページ情報が周方向に分散されながら記録されているため、記録媒体に局所的な欠陥が生じた場合でも、バーストエラーの発生を回避でき、更にページ間のエラー訂正符号も有効となるため、保存されたデータのロバスト性が極めて高い。
- (3) ディスクの内周と外周では一周あたりの長さが違うが、1 周あたりのセクション数を増やすだけで、ディスク全面に渡り最高の記録密度を維持して記録再生を実現できる。
- (4) DMD や CMOS のフレームレートや、レーザーのパルスの繰返し周波数を一定にできるため、データ転送レートを常に最高値に保つことができる。

なお、図 8 9 および図 9 0 で示したプリフォーマット信号および記録再生シーケンスは、HVD が国際標準化される以前のバージョンのヘッダー部の再生信号とシーケンスであるため、最終的な HVD の物理フォーマットおよび上記で説明した論理フォーマットの情報は、世界標準規格のドキュメント『ECMA-377』を参照されたい[3-4]。

5.5 On the Fly 記録再生実験

コリニアホログラフィーを中心に開発されたさまざまな技術を統合して、100rpm で回転する HVD に対して、コリニア方式によるページデータの On the Fly 記録再生実験に成功した。動画コンテンツを多数のページに変換し、光サーボ技術を融合させることで、任意のアドレスに、連続記録によりページを記録再生した。動画コンテンツは著作権の関係で図示しないが、実際に記録再生実験を行なったホログラフィック光ディスクの拡大写真を図 9 2 に示す。記録時の緑色レーザー (532nm) のパルス幅は約 20ns で、対物レンズから出射したエネルギーは 1 パルスあたり約 $7\mu\text{J}$ であった。焦点面付近での露光面積は、ホログラムの直径が約 $220\mu\text{m}$ であることから概算すると、おおよそ 0.0015cm^2

であるため、ページあたりの記録エネルギー密度は $E = 7 \times 10^{-3} \text{ (mJ)} \div 0.0015 \text{ (cm}^2\text{)} = 4.6 \text{ mJ/cm}^2$ と推定される。

記録後に記録媒体を取り外し、もう一度スピンドルにチャッキングした後に、記録時の物理フォーマットに従ったデータの再生にも成功し、コリニア方式におけるホログラフィック光ディスクの可換性も実証した。

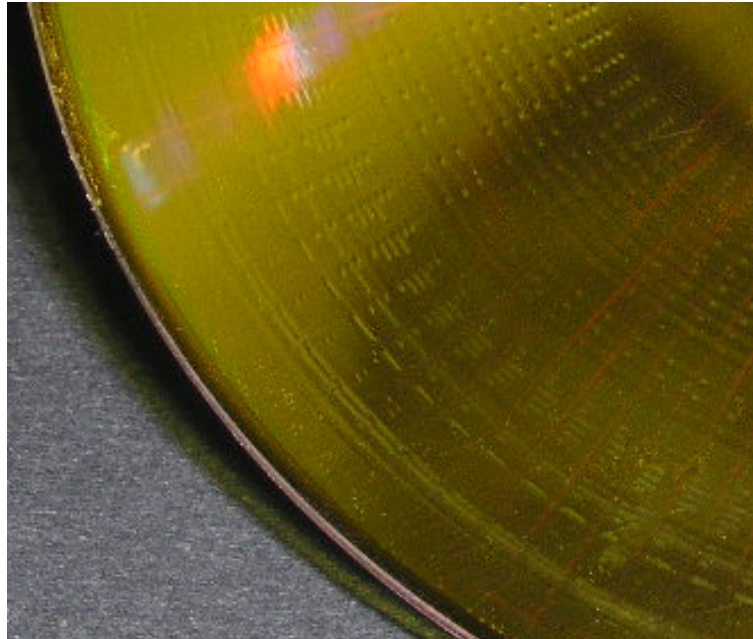


図 92 On the Fly で動画の記録再生実験に成功した HVD の拡大写真

一方、プロトタイプドライブでのダイナミックな記録再生実験を通じて、これまでに見られなかったいくつかの現象が発見された。

まず、記録再生実験中にはあまり顕著に観察されないが、記録再生実験から時間が経過するにつれて、この時に使用した記録媒体では、周方向に多重記録された Peopod を肉眼で観察することができるように変化する現象が確認された。また、観察される Peopod の形状は、実際に多重記録されたホログラム露光サイズの横幅よりも、大きな形となっているように思われる。ページあたりの記録エネルギー密度 $E = 4.6 \text{ mJ/cm}^2$ という値自体は、記録材料の記録感度（約 10 mJ/cm^2 ）に比較して、極端に大きい値ではない。しかし、周方向に $20 \mu\text{m}$ ピッチで複数のセクションによるコリニアシフト多重記録が行なわれていたことを考慮すると、Peapod が長く成長した場所においては、少なくとも 10 多重程度の記録が行なわれていることになり、単位面積あたりの照射エネルギー量は、この 10 倍の 46 mJ/cm^2 以上となっていたことが分かった。更に、ページの再生もほぼ同じ照射エネルギー量で何度も読み出しを行っていた。

これらのことから、比較的大きなレーザーエネルギー密度で多重記録され、さらに再生によって

も過大なエネルギーが局所的に集中して露光されたため、未記録部である Peapod の周囲部分においても、迷光や散乱光の積算などにより徐々に被曝露光し、ホログラム記録された付近の材料が肉眼でも観察できるサイズまで大きく、屈折率あるいは組成そのものの変化したのではないかと推察される。このような局在した大きな屈折率の変化は、赤色レーザー光で検出されるサーボエラー信号に影響を及ぼすため、実際に製品化を検討する際には、記録再生特性の最適化に注意を要するとともに、記録材料の組成などの面からも十分に検討すべき技術課題であるという知見が得られた。

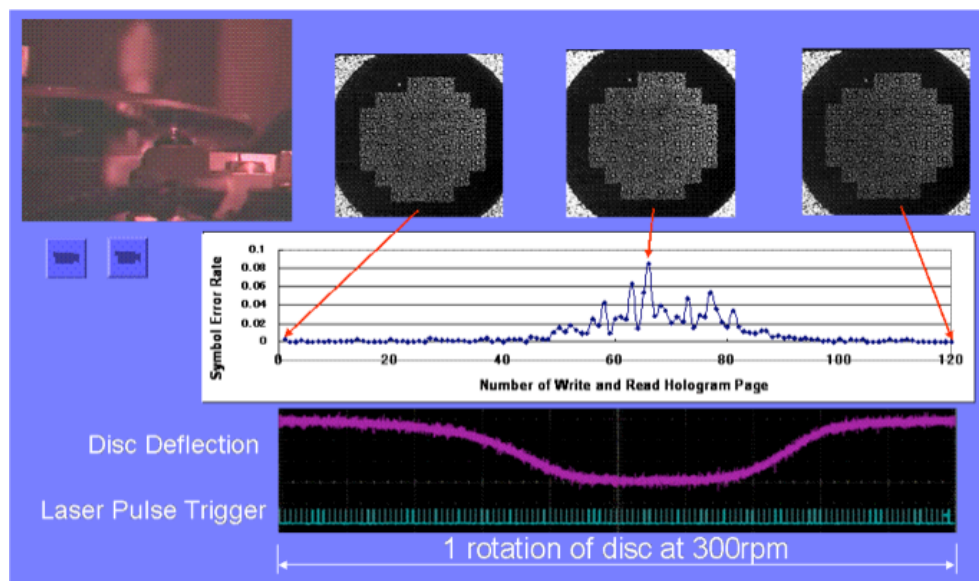


図 93 1 周／1 セクション／120 ページ分のエラー解析結果

また、連続記録再生実験を通じて、ディスク 1 回転中の所定の位置で、エラーが劣化するエリアが存在する現象が観測された。1 周分の記録再生データ、すなわち 1 セクション／120 ページ分の各ページデータを読み出し、エラー評価を行なった結果を図 9 3 に示す。

この評価例では、記録されたページのセクター番号 #56～#81 の位置のページデータのエラーレートが、Symbol Error Rate $> 10^{-2}$ と悪化した値を示している。撮影された再生ページの画像は若干解像度が劣化したようには見受けられるものの、その部分のディスクを顕微鏡などで検査しても記録媒体に傷や異物などは発見されなかった。

そのため、この HVD の機械特性を測定したところ、同図の下に示すように、Symbol Error Rate が悪化していた部分の面ブレ量が最大の振幅値で $300 \mu\text{m}$ を超えていたことが判明した。これにより、Symbol Error Rate が悪化した原因は、試作した HVD が平坦ではなく、局所的に面ブレが発生しており、その結果としてフォーカスサーボにより対物レンズが面ブレに追従しながら記録再生を行なった結果、第 4 章で示したイメージプレーンマージンのスペックを超えたためであると推測された。

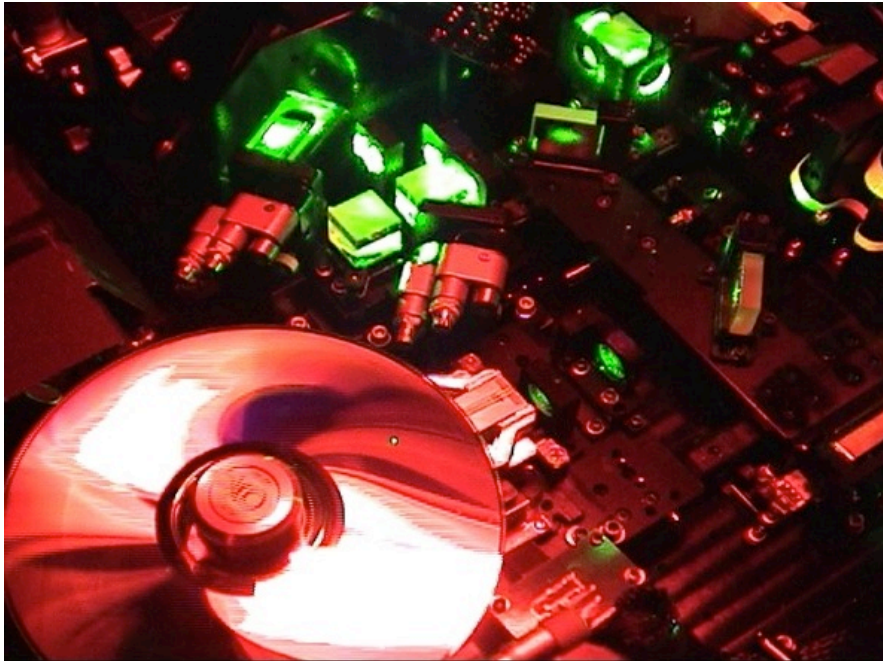


図 94 記録再生中のドライブシステム（ES-1）の様子（赤色照明下で実験）

以上の知見と、これまでの開発を通じて構築した実験上のノウハウを統合して、改良された HVD のディスク全面に対して、最適化した記録再生条件のもと、On the Fly によるコリニア方式のページデータ記録再生でのディスク全面エラーレートの評価を行なった。新しい HVD フォーマットに従い、回転数は 300rpm とした。図 9 4 は、記録再生中のドライブシステム（ES-1）の様子である。筐体は外し、ホログラム記録材料に感光性の無い純粋な赤色の照明下で実験を行なった。ホログラム記録用の Q スイッチパルスレーザー光（緑色）は、ページデータを連続で記録するため、写真のように HVD の裏面からもわずかに透過して観察することができる。全面の記録を行なったあと、HVD は一旦ドライブから取り外し、LED アレイを用いたブリーチング装置でポストキュアを行なった。

全面記録とポストキュアが完了した HVD を、再度ドライブにセットし、全面に渡るページデータを再生紙、各ページデータを解析した。ここでは、エラー訂正処理は施さないで生データのままで評価している。。

全てのデータは膨大であり、表示が混みあって理解しづらいため、約 1000 トラックごとにサンプリングして、エラー分布を可視化表示することにした。その結果を図 9 5 に示す。

図で、一つの丸がサンプリングされた部分を表しており、丸の中の色がエラーレートを示している。例えば、青い丸はエラーレートが低い状態を表し、赤い丸は Error Rate > 0.1 となったバーストエラーを表している。ディスク上のいくつかの部分に赤い丸が存在しているが、ページフォーマットは離散的に記録されているため、ページ間エラー訂正処理を施すことで、データのリカバリーを行なうことができるレベルであった。

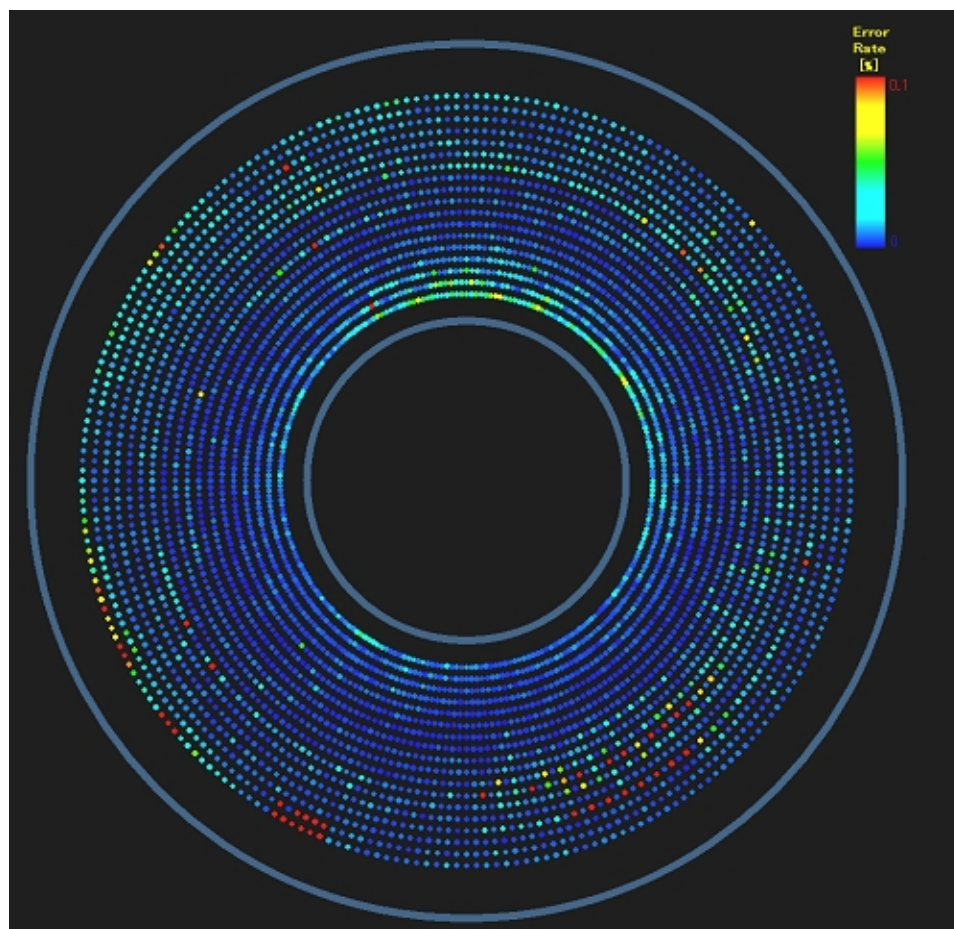


図 95 HVD 全面にわたる記録再生によるエラー分布の評価結果

5.6 まとめ

記録媒体の反射膜にプリフォーマットなどによりアドレス情報を付加する際に、位相ピットからの散乱がホログラム再生像へノイズを発生してしまう問題について、波長選択反射膜を導入することで解決した。これにより、CD や DVD で利用されている光サーボ技術をホログラム技術と融合させることが可能となった。その結果、コリニア方式のコンセプトであった、たった一つの対物レンズを用いてホログラムの記録再生が行える光学系を、ディスク片面側に構成することに成功した。これにより、従来のホログラフィック記録再生では必要不可欠であった除振台を不要にし、更に回転する光ディスクの偏心や面振れにも追従して任意のアドレスに高精度に干渉縞を形成することも可能となった。この記録媒体構造を利用し、ホログラフィック光ディスク：HVD（Holographic Versatile Disc）を完成させた。また、これまで構築してきたコリニア方式の技術を全て融合して、コリニア方式ドライブシステムのプロトタイプ機：ES-1（Engineering Sample #1）を試作開発し、300 rpm で連続回転する HVD の全面にわたり On the Fly でページデータをホログラフィックに記録再生することに成功した。

参考文献

- [1] 橋村 淳司, 野口 一能, “ホログラフィックメモリー用対物レンズの開発,” KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, VOL.4, 73-77 (2007).
- [2] G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink, “Principles of Optical Disc Systems,” Adam Hilger Ltd., (Bristol and Boston, 1985).
- [3] Standard ECMA-377, “Information Interchange on Holographic Versatile Disc (HVD) Recordable Cartridges, Capacity: 200 Gbytes per Cartridge,” (May 2007).
<http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-377.htm>
- [4] Standard ECMA-378, “Information Interchange on Read-Only Memory Holographic Versatile Disc (HVD-ROM), Capacity: 100 Gbytes per disk,” (May 2007).
<http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-378.htm>

第6章

光フェーズロックコリニア方式

6.1 はじめに

ホログラム光メモリーでは、2次元ページデータを3次元的な体積記録媒体へ記録再生することで、大容量と高転送レートを実現してきた。より効率的な記録再生を行なうために、コーディング方法を改良し $\text{Code Rate} = 1.0$ にできるだけ近づける研究や[1-4]、記録再生データの1画素をCMOSセンサーの1画素と1:1に合致させて検出するPixel Matching法の研究も報告されている[5-6]。この他に、更なる超高密度化と超高転送レート化を実現する試みも報告されている。その一つがIBMで行なわれた中間調による多値記録ホログラムメモリーの研究である[7]。これまで2値のデジタルデータであった1画素を、中間調表示により多値化して情報量を増やし、記録密度と転送レートを飛躍的に向上させようとする試みである。しかしながら、中間調を正確に記録再生するためにはSNR（信号対雑音比）の高い記録が必要であるため、結果として、記録密度は最大でも30%程度しか向上できないことが理論的にも結論付けられた[8]。また、Denzらを始めとして、多くの研究者がホログラムの持つ大きな特徴の一つである「光の位相」を情報データとして記録再生するホログラフィック光メモリーの研究を行なった[9-18]。しかし、光路中の空気の揺らぎや記録媒体の微小な振動が位相外乱となって記録再生に影響を及ぼすため、位相情報の記録再生実験は難しく、報告された内容も基礎原理実証の域に留まっている。

一方、コリニアホログラフィーでは、情報光と参照光が同一の光路を進みながら記録と再生を行なうため、光学系をコモンパスで構成することが可能である。そのため、光路中の空気の揺らぎの影響をほとんど受けず、記録媒体の振動にも強いホログラム記録再生環境を構築できる。特に、光サーボ

技術を適用した場合には、記録媒体との相対的な位置を波長の $1/20$ 以下（数十ナノメートル）のオーダーでダイナミックに再現することが可能である。

そこで、コリニア方式で構築したこれまでの基本技術を土台として、2次元ページデータに位相情報を付加した次世代のホログラム記録再生方法の基礎研究開発を行なった。これまでは図96（左）に示すように、空間光変調器に白黒2値の強度変調されたデジタルデータを用いて16画素で8ビットの記録再生を行ってきたが、これに、ピクセルがもともと有している光の位相情報を有効に活用し、究極的には同図（右）のように、1画素だけで最大8ビットの位相多値情報を持ったコリニアホログラフの実現可能性を示す事を目標とした。電気回路に用いられているPLL回路のように、フィードバックを掛けながら位相検出誤差が少なくなるように修正していけるため、「光フェーズロックコリニア方式」あるいは単純に「光フェーズロック方式」と呼ぶことにした。

この章では、まず、光フェーズロックコリニア方式の基本原理について説明するとともに、実験光学系の構成とページデータの構成について述べる。次に、光フェーズロック方式による位相多値階調の記録再生実験の結果について述べ、32階調（5 bit）の情報を1ピクセルに付加した状態でも低いエラーレートで位相値が読み出せる事を実験結果で示す。更に、参照光を位相コード化して同じ位置に複数の位相多値ページデータを多重記録する方法について、基礎原理実証した結果を示す。

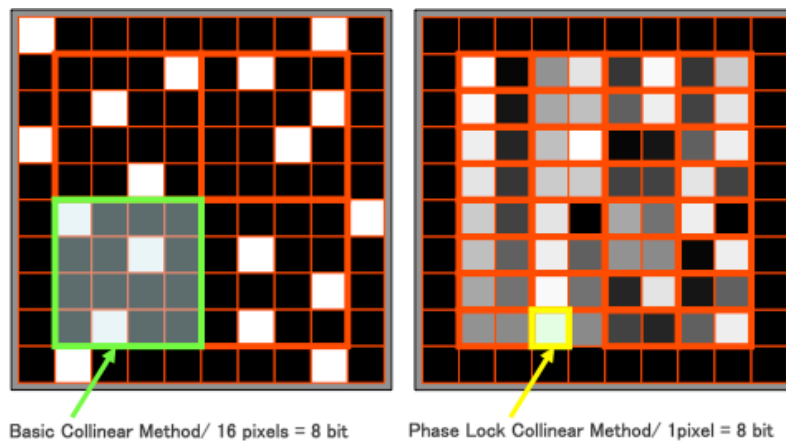


図 96 光の位相情報を記録再生する「光フェーズロックコリニア方式」の基本コンセプト

6.2 光フェーズロックコリニア方式の基本原理

6.2.1 基本原理と記録再生実証実験

図97は、位相多値階調のデータを記録再生する「光フェーズロックコリニア方式」の基本原理説明図である。基本的なコリニア方式に用いられている円環状の参照光を分割して2つに分けて用いる。図97では8分割の場合を示しており、そのうちの4つを用いて、位相の基準となる「ロック光のペ

ージパターン」を生成する。そして他の4つを用いて、ユーザーデータとなる位相多値階調の情報を持った「データ光のページパターン」を生成する。そして、この2つのページパターンを、同一の場所に、それぞれ独立に記録を行なう。データの再生は、「ロック光」と「データ光」の両方の参照光、すなわち8つが繋がった円環状の参照光を記録位置に照射することで行なう。そうすると、「ロック光の情報光パターン」と「データ光の情報光パターン」の両方が同時に再生され、双方の同じ位置のピクセル同士が位相干渉して、強度変調された信号が検出される。ロック光の位相は既知であるため、データ光の位相がロック光と同じ位相の場合には強め合い、逆の位相の場合には弱め合うため、幾つかの手法を用いるが、最終的にはデータ光の各ピクセルの絶対値の位相を求めることができる。これが、光フェーズロックコリニア方式の基本原理である。

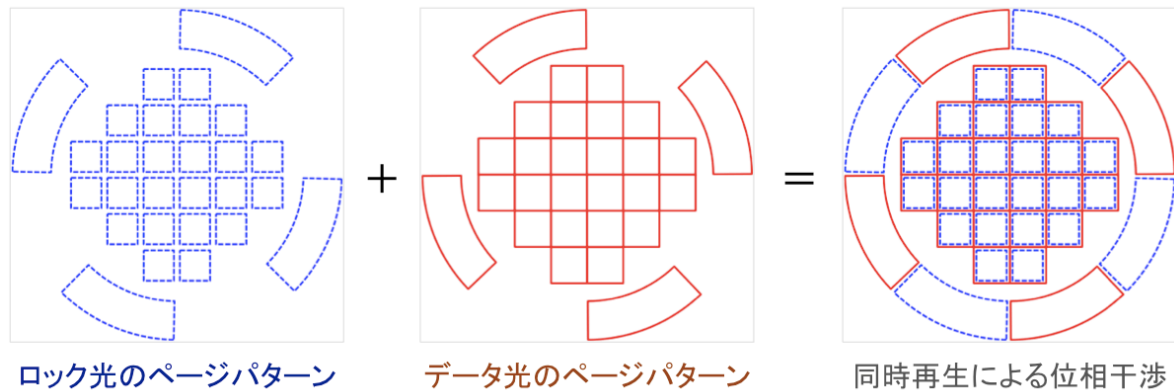


図 97 光フェーズロックコリニア方式の基本原理説明図

この基本原理を、実際に記録再生実験によって確認した結果を図98に示す。同図で(a)はデータ光を記録し、データ光の参照光のみで再生した時の再生画像である。(b)はその一部を拡大した画像である。また(c)は記録時に付加した位相情報である。(b)の拡大観察が像からも分かる通り、この時点では記録時に付加した位相情報は検出されず、一様な強度の再生像となっている。

次に、データ光を記録した同じ位置に、ロック光を重ねて記録し、そのあとロック光の参照光のみで再生した時の再生画像とその拡大画像が(d)と(e)である。(f)にはなにもパターンが表示されていないように見えるが、ロック光の位相はどのピクセルに対しても同一の位相としているため、このようになっている。拡大観察像(e)をみても、この時点では、一様な強度の再生像となっている。

次に、「データ光」と「ロック光」の両方の参照光を同時に照射して再生したところ、(g)に示す再生像が得られた。これを拡大観察したのが(h)であるが、これまでとは異なり、各ピクセルの輝度が明るいものから暗いものまで様々に変化しているのが確認された。そこで(i)に「データ光」に付加した位相情報(位相空間光変調器に表示するグレー階調の画像)を並べて示したところ、輝度の分布が概ね一致する事が分かった。

この実験を通じて、全く同じ位置に「データ光」と「ロック光」を多重記録したにもかかわらず、参照光の分割パターンに対応した再生像が独立に再生される事が確認された。また、それぞれの再生像の SNR を犠牲にする事無く、位相干渉によって中間調による多値の検出が行なわれている点も注目に値する。更に、コモンパス光学系の恩恵により、多値階調画像は極めて安定して表示されており、再現性も高いことが確認された。

以上のことから、光フェーズロックコリニア方式の基本原理が、実験によって実証された。

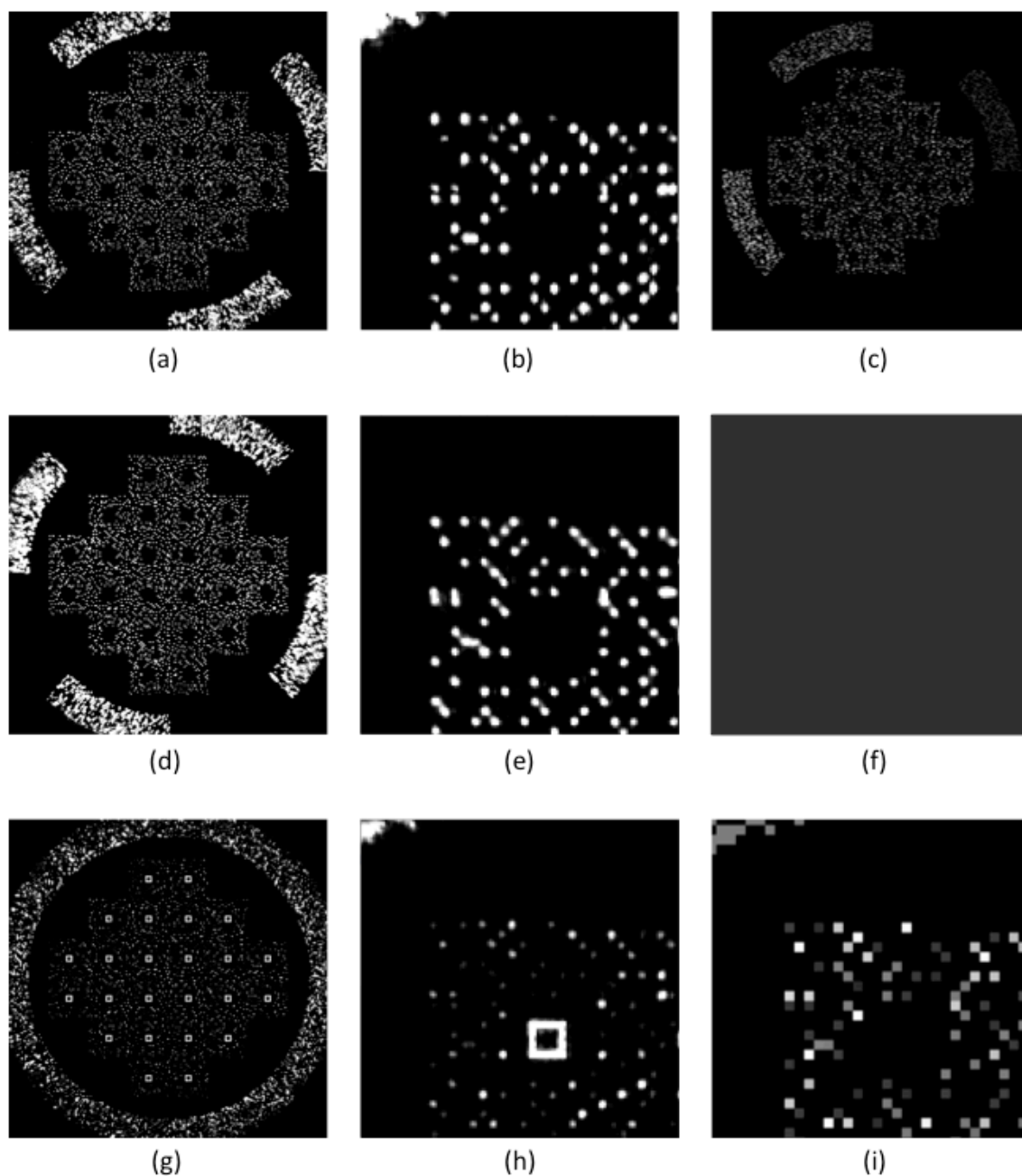


図 98 光フェーズロックコリニア方式の記録再生実験による原理実証

6.2.2 光フェーズロック方式の記録再生実験光学系

光フェーズロック方式の記録再生実験光学系の構成を図99に模式的に示す。図100は、実際の光学系の外観写真（左）と、装置に組込まれた浜松ホトニクス製の空間光変調器：LCOS とドライブユニット（右上）、そしてホログラム記録媒体のサンプルホルダー部の外観写真（右下）である。

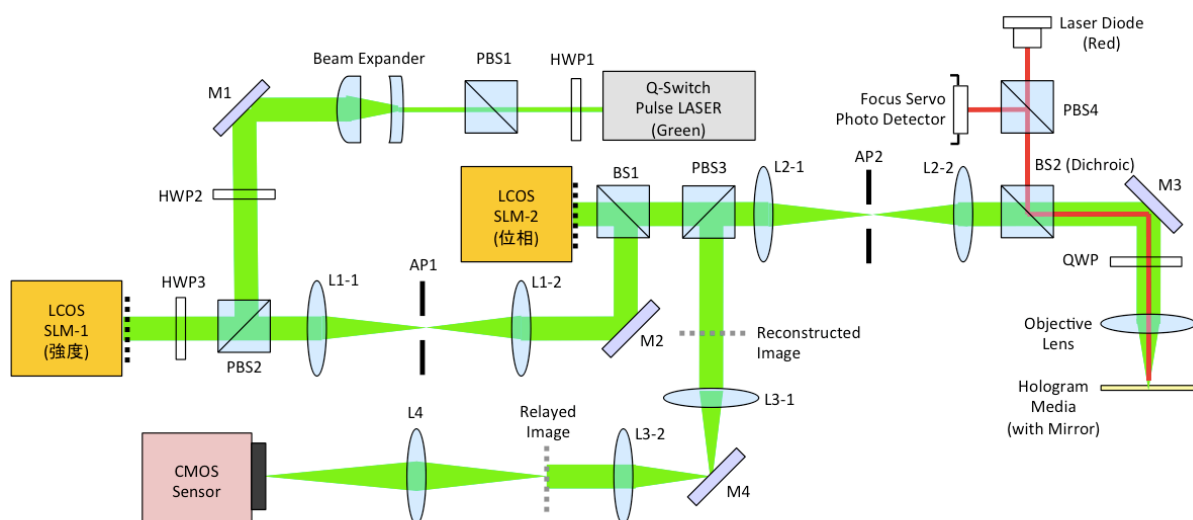


図 99 光フェーズロック方式の記録再生実験光学系の構成

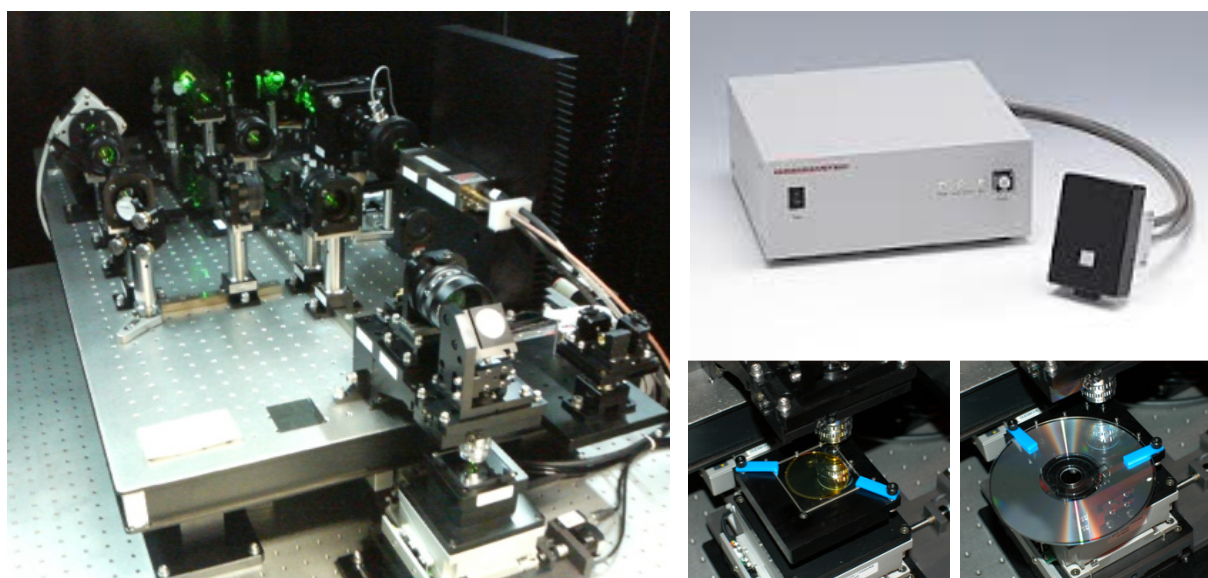


図 100 実験光学系の外観写真（左）、装置に組込まれた浜松ホトニクス製の空間光変調器：LCOS とドライブユニット（右上）、ホログラム記録媒体のサンプルホルダー部の外観写真（右下）

光フェーズロック方式の記録再生光学系の主な特徴は、強度変調用の空間光変調器（SLM-1）と位相変調用の空間光変調器（SLM-2）という2つのデバイスを用いている点である。使用した浜松ホトニクス製のLCOSは、デバイスへ入射する直線偏光の偏光方向を 90° 変える事で、強度変調用と位相変調用に使い分ける事ができる。このため、同じデバイスをL1-1およびL1-2による1:1のテレセントリックな4f系のリレーレンズで組み合わせる事でピクセルマッチングが行なわれており、この2つのデバイスの組合せにより、画素単位で強度と位相の両方を制御する事が可能となった。表示階調の分解能は、強度および位相とも8ビット（256階調）である。位相変調量の最大値は $0 \sim 2\pi$ であり、デバイスのドライブユニットに入力される8ビットのグレー階調に対応して位相階調が表示される。

SLM-2より後段の光学系は、通常のコリニアホログラフィー光学系と、全く同じ構成である。

6.2.3 光フェーズロック方式のページデータ構造（基本原理実験用）

上述のように、光フェーズロック方式の光学系は、空間光変調器の機能が位相も取り扱えるように変化しているだけで、基本的には、通常のコリニアホログラフィーに用いている光学系と全く同じ構成となっている。すなわち、ページデータの構造だけが進化した形と考えれば、非常に理解しやすい。以下で、光フェーズロック方式におけるページデータ構造を図示しながら説明する。

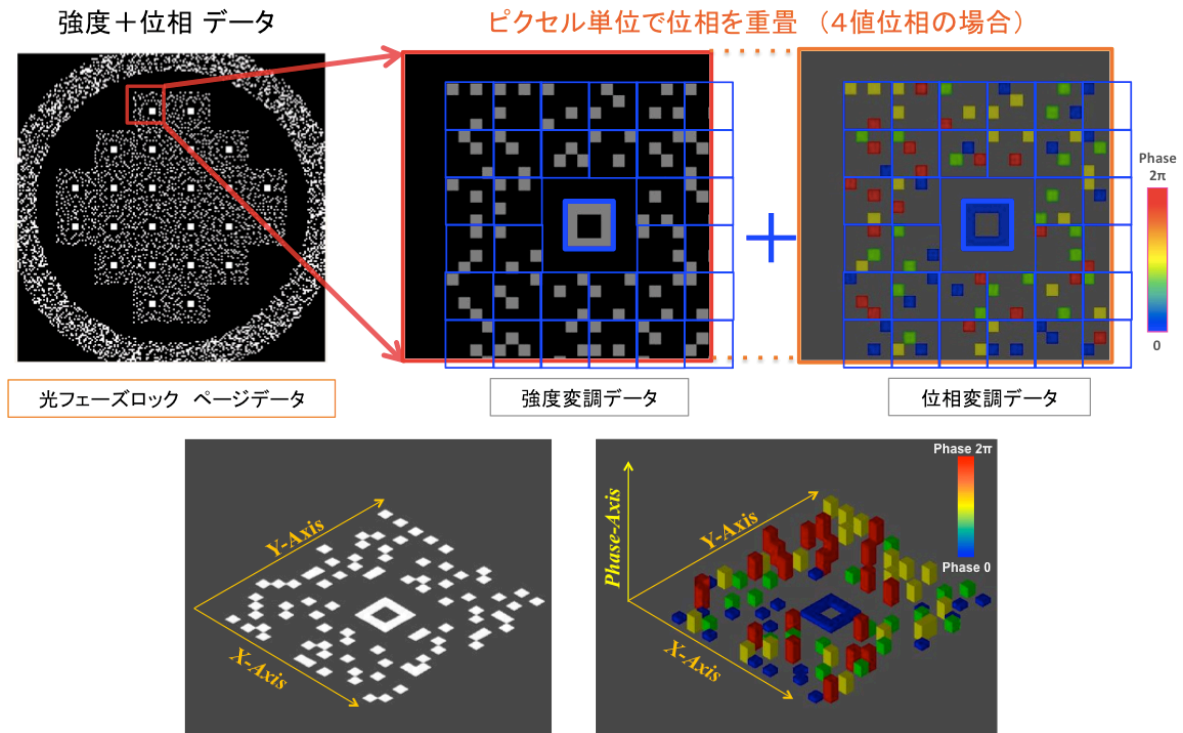


図 101 光フェーズロックコリニア方式におけるページデータの構成（強度情報+位相情報）

図101は、光フェーズロック方式のページデータを強度と位相に分解して模式的に示したものである。強度変調パターンは、SLM-1で生成されるが、HVDに用いられている3-16 Modulation Codeを用いている。この時点でCode Rate = 0.5となり、もったいないように思われるかもしれないが、通常のコリニア方式と定量的な比較を行なうために、敢えて、基本原理実験用としてはこの強度変調パターンを採用することにした。その結果、16ピクセルのうち3ピクセルがON表示となるが、このONピクセルの一つずつに、SLM-2において、位相情報が付加される。同図では、 $0 \sim 2\pi$ を4つに分けた4値の位相階調（2ビットの位相情報）が付加された場合を示している。位相干渉によりCMOSセンサーで検出された場合には、位相値は同図（右下）に棒グラフ上に示したように、それぞれのピクセルの位相値は強度値として検出が行なわれる。

このようにして強度変調に位相変調を加える事により、ページあたりの情報量を増大させる事が可能になる。

次に、位相情報を付加する事でページの情報量がどのように増大していくのかを、図102を用いて説明する。なお、実験装置に組込まれている空間光変調器（LCOS）は、ピクセルサイズが $20\mu\text{m}$ 角とDMDの $13.7\mu\text{m}$ 角よりも大きいため、対物レンズの瞳径に表示可能なピクセル数が減少する。そのため、光フェーズロック方式の実験用のデータページは、 6×6 Sub-Pageの四隅を3 Sub-Pageずつトリミングして表示しているため、24 Sub-Page（ $24 \times 32 = 768$ Symbol）と小さな形となっている点に注意されたい。まず、Symbol (=16 Pixel) を一つ抽出した場合、強度変調により載せられる情報量は、通常のコリニア方式と同じ8 bitであり、Code Rate = 0.5となっている。次に、このON Pixel一つずつにn bitの位相情報を組込めれば、 $3 \times n$ bitの情報量の向上が可能となる。記録材料の特性にも依存するが、もし $n = 4$ bit、すなわち16値階調の位相多値記録再生が実現できれば、このHVDフォーマットをベースにした場合においても、強度変調8 bit + 位相変調12 bit = 20 bit / Symbolとなり、Code Rate = 1.25と飛躍的な情報量の増大が期待されることになる。

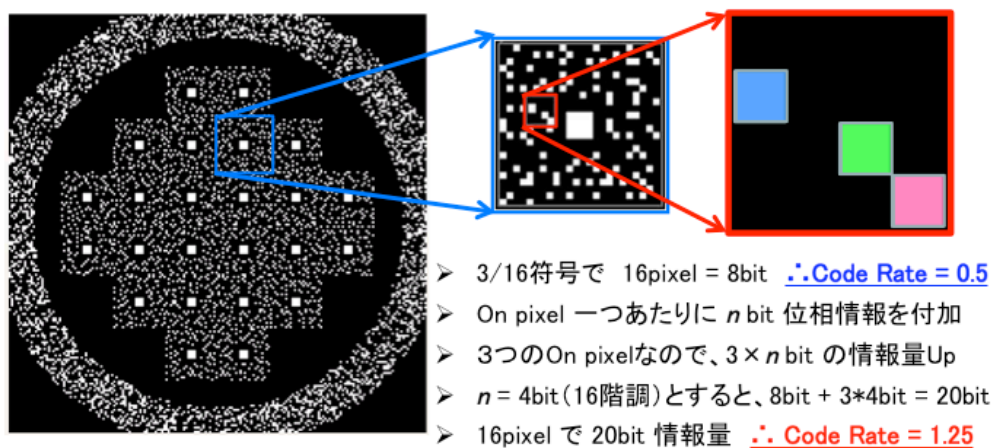


図 102 HVD 上位互換の実現を意図した場合の、位相多値情報の付加方法

6.2.4 位相多値ページデータの記録再生プロセス

上述の光フェーズロック方式の記録再生実験光学系を用いて、位相多値ページデータを記録再生し、位相干渉により位相多値情報を検出するプロセスについて説明する。

図103に示すように、ロック光パターンでは位相はページ全面にわたり一様な位相となっており、分割した参照光をそれぞれ EFGH と記号をつけておくことにする。一方、データ光パターンでは情報光エリアのピクセルごとに異なる位相情報が付加される（拡大図参照）。また、データ光の分割参照光にも、それぞれ ABCD と記号をつけておくことにする。ここで、データ光の場合には、分割した参照光が異なる位相情報が組込まれていることが分かるが、これは、後にデータ光ページを位相コード化して多重記録を行なう時に使用するためであるが、この使用方法については別途説明するため、ここでは省略する。

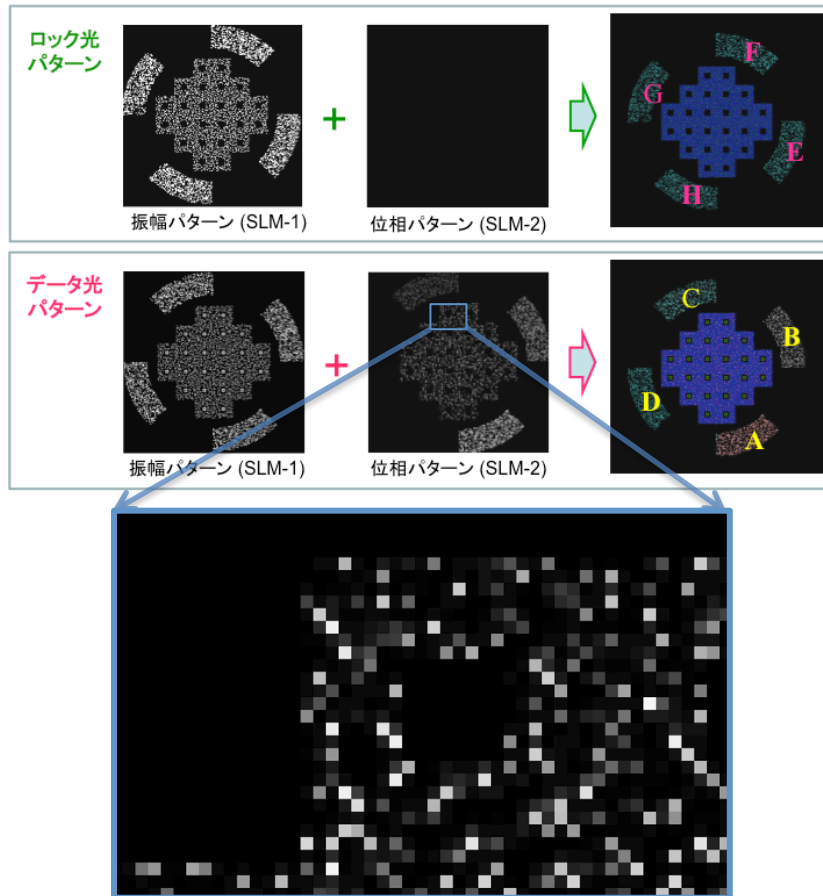


図 103 ロック光 および データ光の強度+位相によるページデータ構成

このようにして用意された強度パターンと位相パターンのデータを SLM-1 と SLM-2 に表示して、図104に示すように、ロック光とデータ光を、順次、同一場所に多重記録する。

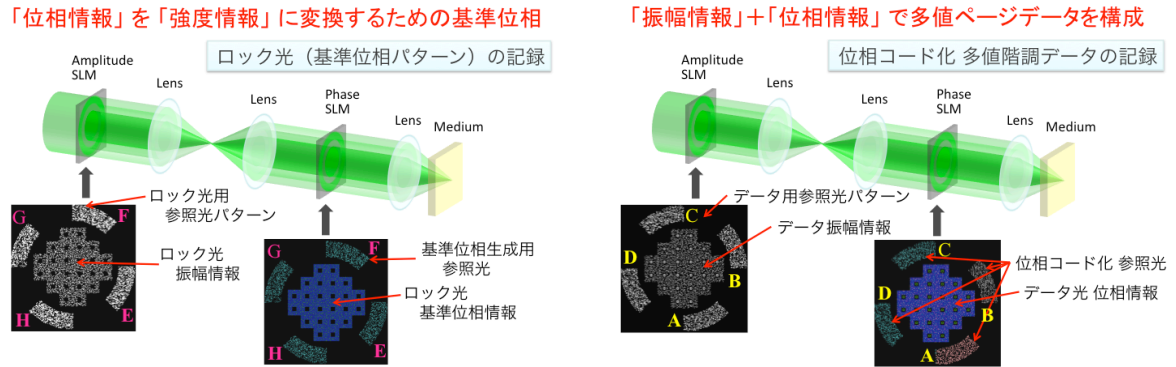


図 104 ロック光 および データ光 の記録プロセス

次に、このようにして同一場所に記録された2つのホログラムを、図105に示すように、分割した参照光を組み合わせて円環状にして、同時に再生を行なう。このとき、再生されるページデータの位相は、再生用参照光の位相が反映されている。そのため、同図右側に示すように、円環状の参照光のうち、ロック光の部分の位相を変えて再生する事で、再生されるデータ光と干渉するロック光の再生像の位相を制御する事ができる。

データ光の 픽セルごとに付加された多値化位相情報は、この制御により正確に求める事ができる。例えば、同図のように、ロック光の位相を 90° ずつ位相が異なるように、“0”、“ $\pi/2$ ”、“ π ”そして“ $3\pi/2$ ”と変化させた4枚の位相干渉再生像を取得し、それぞれの再生像の 픽セル毎の輝度値を I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D とすると、データ光の位相値は次式により得られる。

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_D - I_B}{I_C - I_A} \right) \quad (12)$$

「ロック光」と「データ光」を同時に再生し 位相干渉させ検出

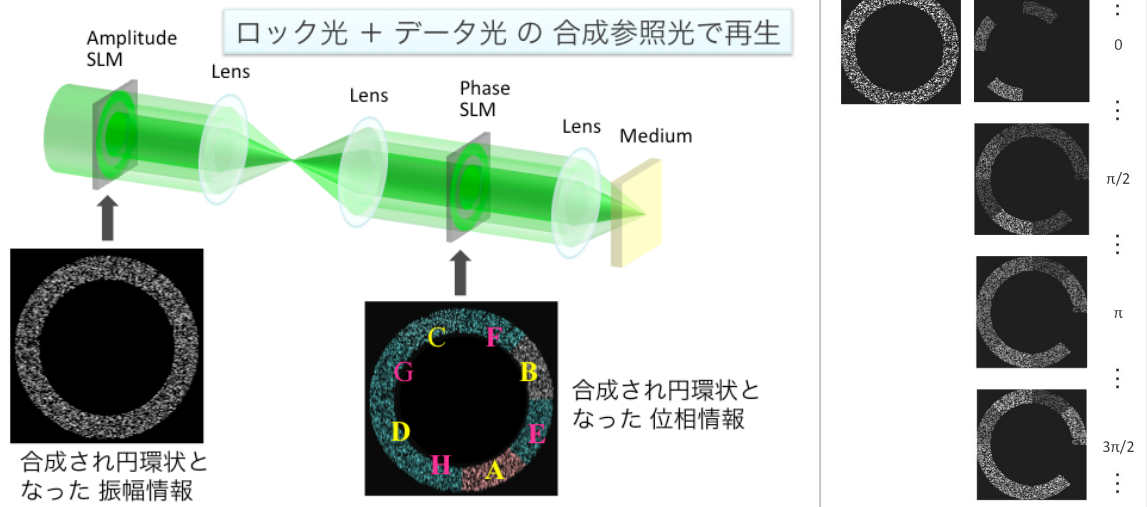


図 105 円環参照光の同時再生：ロック光の位相で、データ光との位相干渉をシフト制御する

あるいは、近年のデジタルホログラフィによる3次元計測で利用されている、ピクセルごとに 90° ずつ異なる位相を検出可能な CMOS センサー[19]を用いることができれば、1ショットの再生画像から一括して位相値を求める事も、原理的には可能である。

しかし、研究段階では光フェーズロックコリニア方式の特性をより理解するために、実際にはロック光の位相を例えば16値に変化させて、より多くの位相干渉再生画像を撮影し、図106に模式的に示すように、ロック光の位相の変化に対する輝度値の変化を \sin 波でフィッティングして、ピクセルごとの位相を求める方法を用いた。

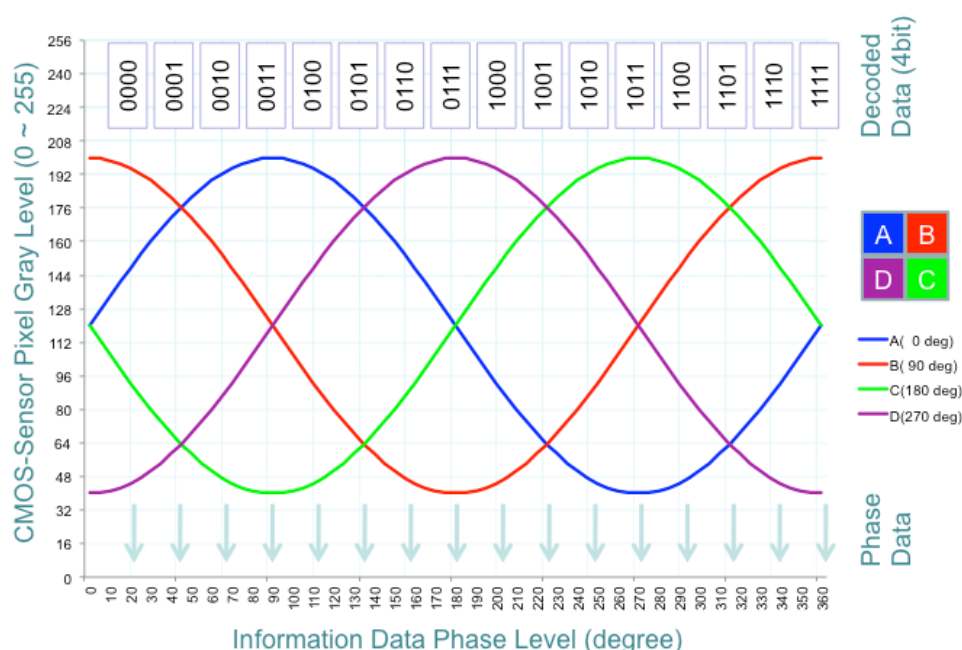


図 106 4ビット多値位相データと CMOS センサー上でのグレイレベルの関係

6.3 光フェーズロックによる位相多値階調の記録再生実験

6.3.1 4値位相階調の記録再生基礎実験

まずは、4値 (2 bit) の位相階調を持ったデータページを用いて、光フェーズロック方式による位相多値情報記録再生の基礎実験を行なった。記録媒体は、MEXT プロジェクト (文部科学省) を通じて開発されたもので、記録材料は共栄社化学において開発された「ナノゲルフォトポリマー」を用い、これをメモリーテックにおいて HVD の光ディスク形状に仕上げたものである。実験装置の光学ヘッド周辺と、XYZ 自動ステージによるサンプルホルダーにセットされたホログラム記録媒体 (HVD) の外観写真を図107に示す。なお、光フェーズロックの記録再生実験においては、フォーカスサーボによる焦点位置制御のみを行ない、光ディスクは回転させずに静止したまま記録再生実験を行なった。

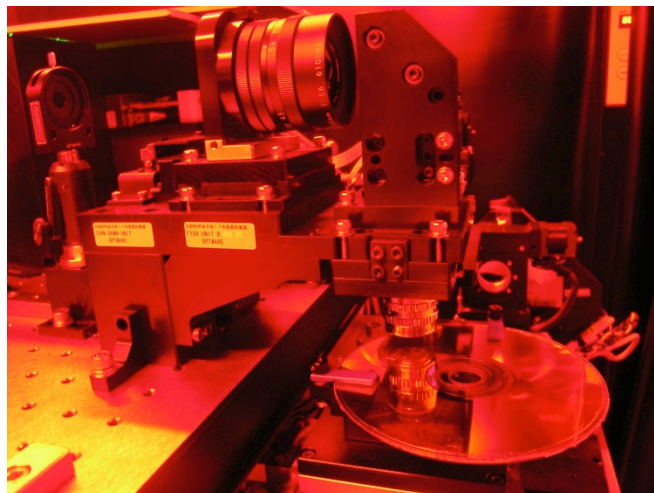


図 107 光フェーズロック実験装置にセットされたホログラム記録媒体（HVD）

4 値の位相多値データの記録と再生を行ない、位相値の検出を行なった結果を図 108 に示す。同図（左）は、専用設計された解析ツールの画面である。描かれている波形は、ロック光の位相を 16 段階に変化させて得られた再生画像から、ピクセル毎の輝度値を折れ線で繋いでプロットしたものである。このデータをピクセル毎に \sin カーブにフィッティングして、再生された位相値を推定した。同図（右）は、このようにして求められた各ピクセルの位相値を、入力した位相値（横軸）上にヒストグラムとして表したものである。右のヒストグラム中に黄色の線で示したのが、実際に記録に用いた位相値である。4 値の位相は分離して検出されているものの、再生された位相の分布の中心値からはズレが生じており、再生の位相値エラー（誤差）が生じていることが確認された。

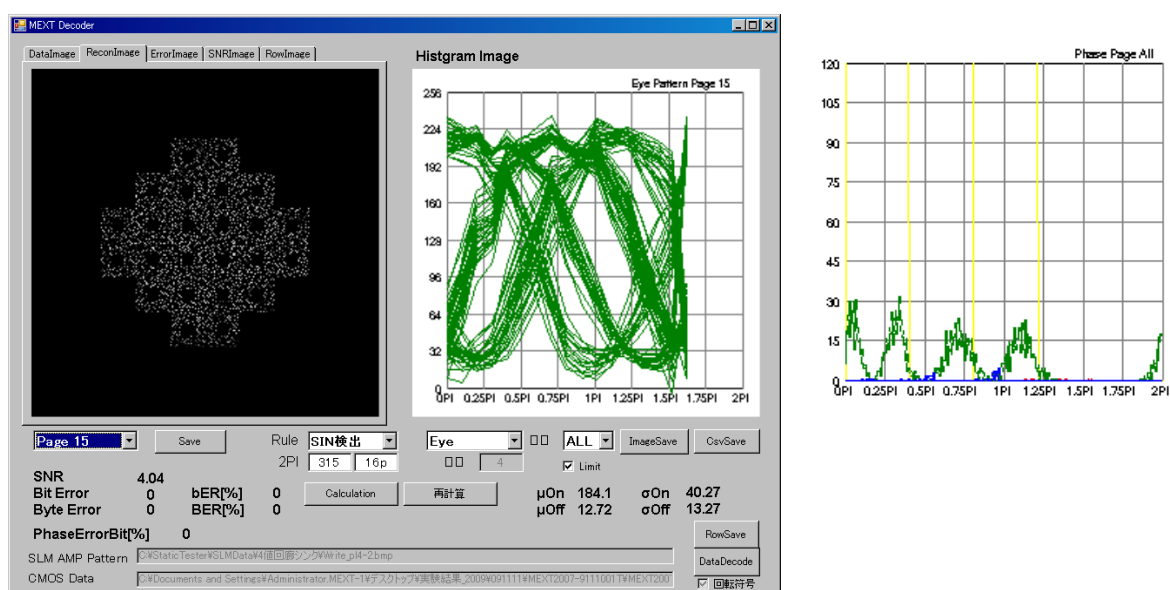


図 108 光フェーズロック方式による 4 値位相多値データ記録再生の基礎実験結果

6.3.2 位相値エラーの要因分析

この位相値エラーの要因を分析したところ、強度変調ムラが大きな原因となっている事が分かった。SLM-1 で生成される強度変調ページデータを観察したところ、他の光学部品から発生したと見られる比較的大きな迷光ノイズが観測された。また、図109に示したように、LCOS で生成される強度変調画像の黒レベルが完全ではなく、コントラストの低い強度変調画像となっている事も判明した。そのため、同図に示すように、迷光の少ない光学部品に置き換える改良を行った他、映像の直接観察によるフィードバックを行ない、強度変調量が最大となるような補正画像を生成し、LCOS ドライバーに付属の機能を用いて、入力信号を補正して表示するようにした。この結果、迷光は除去され、強度変調画像のコントラストも1400:1と極めて高品質な強度変調画像が生成できるようになった。

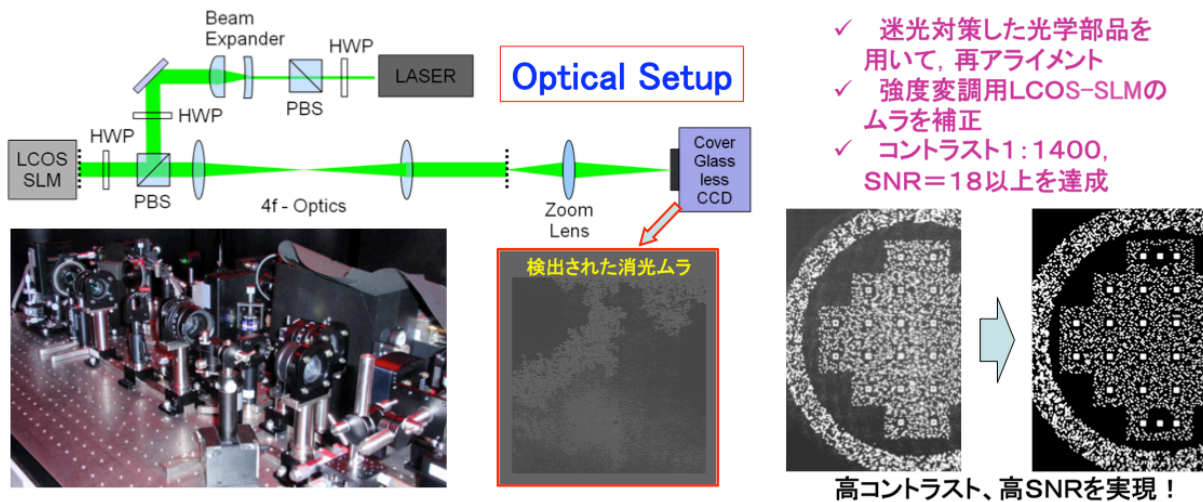


図 109 LCOS での強度変調量が均一で最大となるような補正画像による位相値エラーの低減

6.4 光フェーズロック方式の位相多値階調記録再生特性

光学系の最適化調整を行なった後、位相の階調を、4 値 (2 bit)、8 値 (3 bit)、16 値 (4 bit)、32 値 (5 bit)、そして、256 値 (8 bit) と変化させて、光フェーズロック方式による位相多値階調データの記録再生特性を評価した。4 値 (2 bit) から 32 値 (5 bit) までの解析結果を図110に示す。光学系の最適化調整の結果、基礎実験での 4 値位相階調の記録再生結果と比較して、検出された位相の分布幅が小さくなっているのが分かる。なお、多値位相の階調が増すほど検出位相分布のピークが小さくなっているが、これはページデータ内のピクセル数が同じであるため、位相階調ごとに振り分けられる事によってそれぞれの位相の総数が減っているためである。

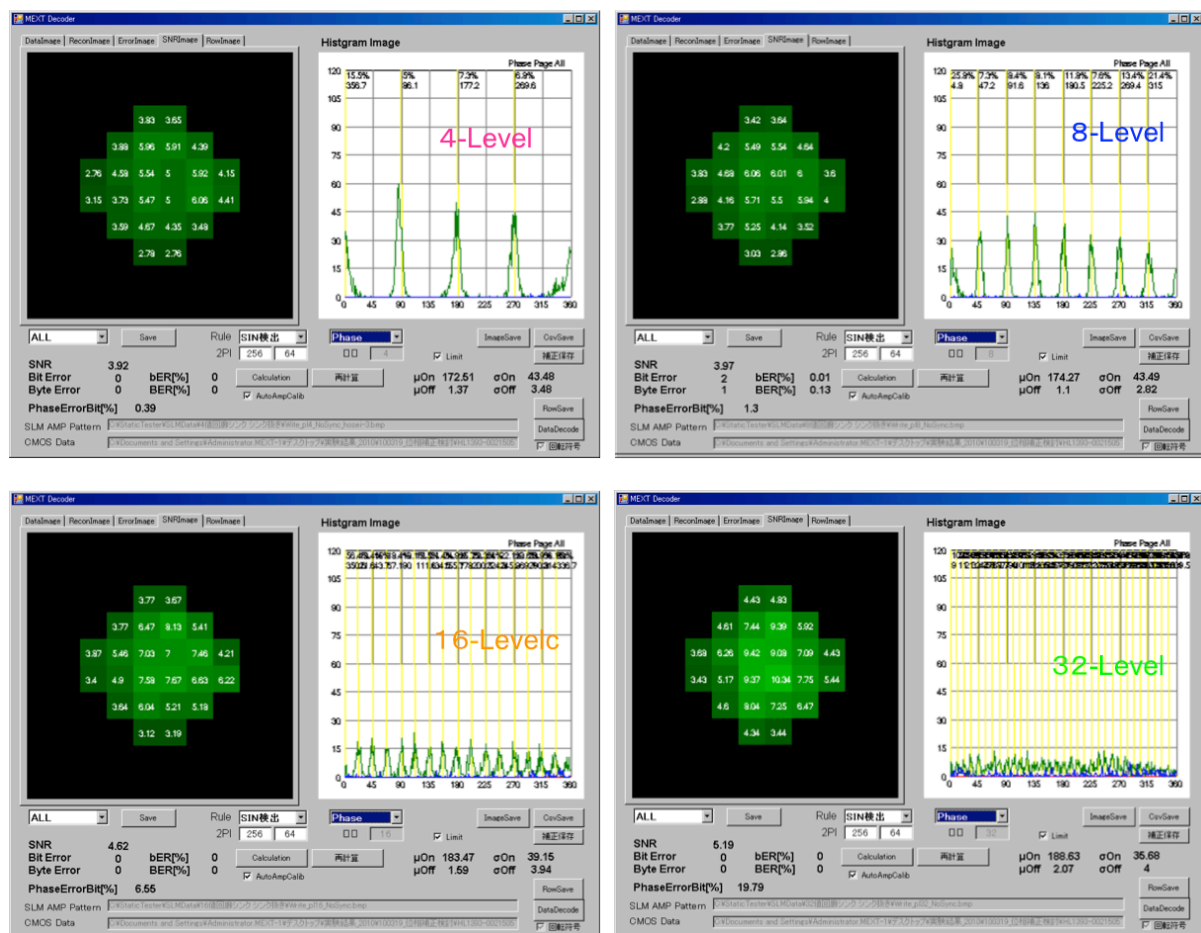


図 110 光フェーズロック方式による位相多値階調記録再生データの解析結果

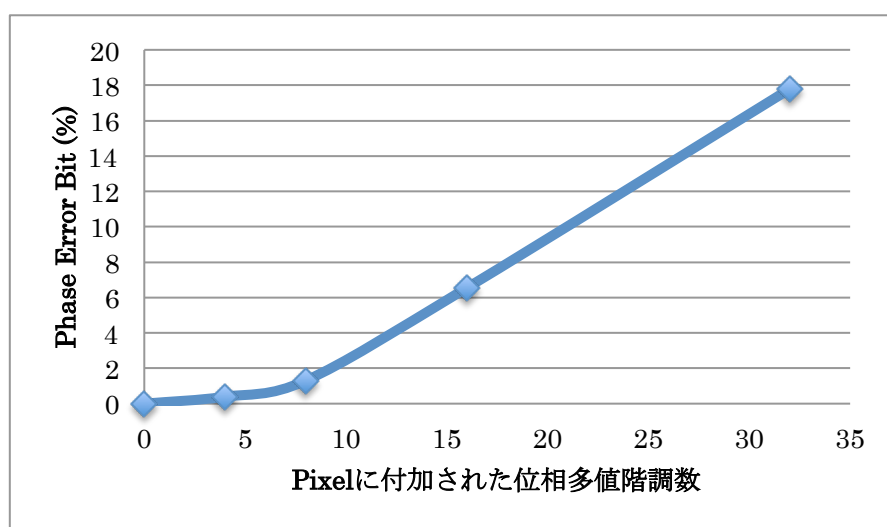


図 111 位相多値階調数に対する位相エラー（Phase Error Bit）特性

図 1 1 1 は、ピクセルあたりに付加された位相情報の多値階調数を横軸にとり、記録した本来の位相と記録再生後に検出された位相を比較して、違った位相値になって検出されたピクセル数を比率であらわした **Phase Error Bit (%)**を縦軸にして、実験結果を表したグラフである。位相の幅は $0 \sim 2\pi$ が最大値であるため、この位相を階調数で割って表示する場合、位相階調数が増せばその位相を検出するウインドウが狭まることになる。そのため、位相の分布がこのウインドウに比較して大きい場合には、隣接する位相検出ウインドウに間違っ検出されてしまう確立が増加することになるため、**Phase Error Bit (%)**が悪化することになる。エラー訂正の観点から、**Phase Error Bit (%)**の値が 20% 以下であれば許容範囲内である。より望ましくは 10%以下と考えても、評価結果から、16 値 (4 bit) の位相多値階調による光フェーズロックコリニア方式の有効性が、実験によって世界で初めて示された。

更に、256 階調 (8 bit) の位相を付加したページデータによる、光フェーズロック記録再生実験を行なった。解析結果を図 1 1 2 (左) に示す。各ピクセルの位相は、ロック光の位相を変化する事で、きれいな sin 波でフィッティングがされるが、**Phase Error Bit = 92.7 (%)**という結果となった。しかし、記録した位相と再生された位相の関係をグラフにプロットすると、同図 (右) に示したようにリニアに位相階調が表示されている事が確認された。

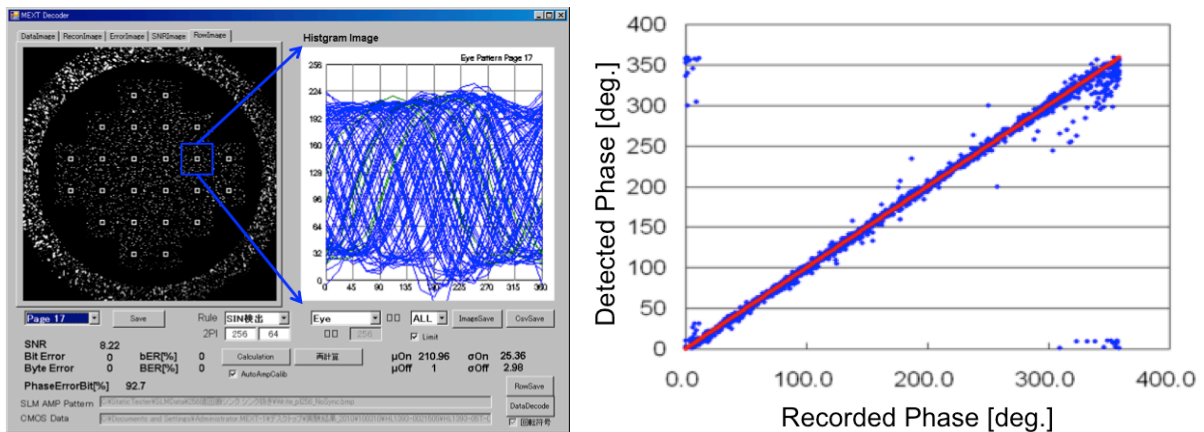


図 112 256 位相多値階調 (8 bit) による光フェーズロック記録再生実験の解析結果

6.5 位相コード化多重記録再生の基礎原理実証

光フェーズロック方式では、再生されるページデータの位相は再生用参照光の位相が反映されていることは、既に実験によっても実証済みである。そこで、データ光用の分割参照光の位相を調整することで、同じ場所に異なるページデータを多重記録する、いわゆる「位相コード化多重記録再生」を行なう事ができるのではないかと考えた。多重するページデータの数に応じて、例えば図 1 1 3 に示

すように、円環状の参照光の分割数を増やす事も可能である。

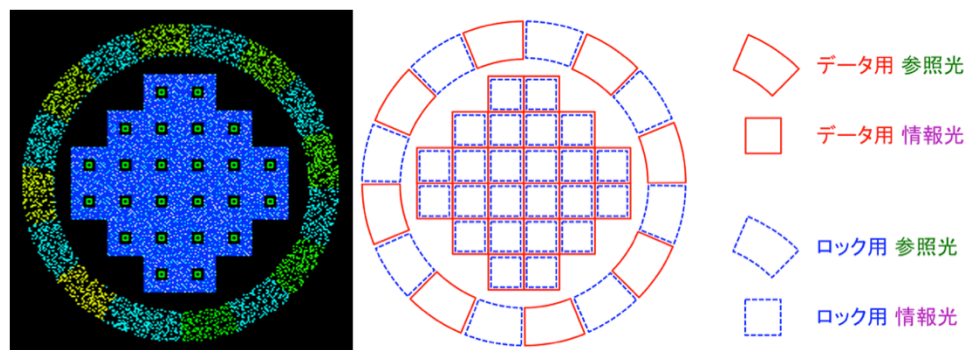


図 113 位相コード化多重方式のための、参照光 16 分割ページフォーマット例 (8 Segment x 2)

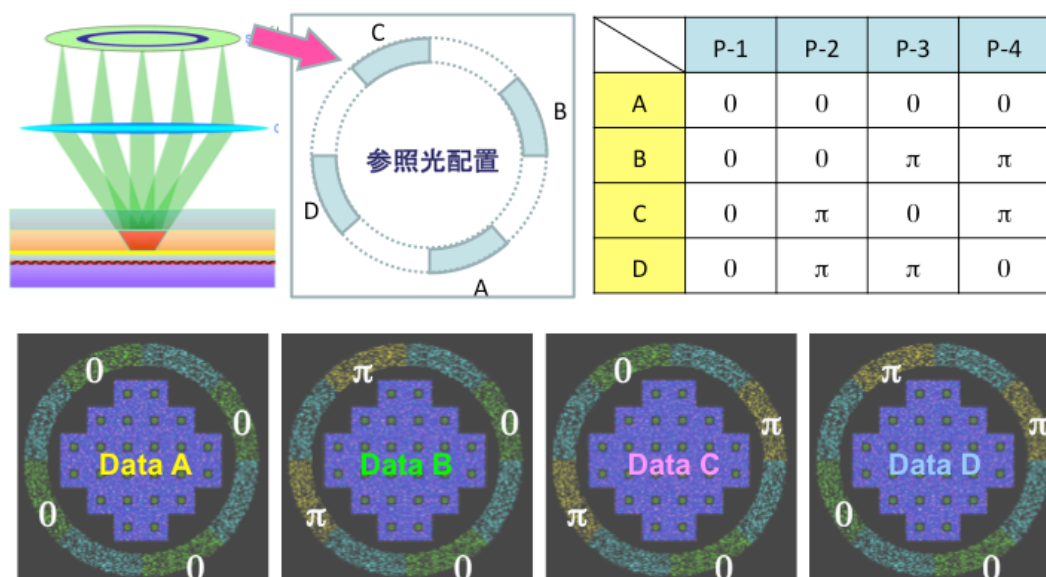


図 114 位相コードによる多重記録再生に用いる直交系位相コードとページデータ

しかし、ここでは基礎的な原理の実証を行なうため、これまでと同じ 8 分割 (4 Segment x 2) のパターンで実験を行なった。図 114 に、実験に用いる位相コードを模式的に示す。データ光の分割参照光の位置をそれぞれ ABCD とし、そこに 1 か -1 のコードを直交系で配置する。光の位相では、 0° の位相と、逆相になる 180° (π) の位相で構成する事になる。そのため、位相コードのパターンは、P-1 から P-4 までの 4 種類となる。実験方法は以下に行なう。同じ位置に、4 種類のコード化したデータ光と、共通に用いる 1 つのロック光を多重記録し、それぞれの位相コードで再生を試みる。位相コードに対応したデータだけが再生されれば、基礎原理は実証される。ページ光には異なるデータ (Data A ~ Data D) を使い、デコードされたデータのエラーレートで確認をとるようにした。更に、データ (Data A ~ Data D) は、4 値の位相多値階調を付加したデータを用いた。

最初に、位相コード再生の基礎実験を行なった。実験結果を図 1 1 5 に示す。上の段の 4 つの再生データを用いて、実験結果を説明する。まず、単独のホログラムとして P-1 の記録位相コードでホログラムを記録し、これに P-1 ～ P-4 の再生位相コードを照射した場合の再生像を CMOS センサーで読み取った。上の段では、記録と同じ P-1 の再生位相コードの参照光でのみ再生像が得られる事が分かった。同様に、P-2 ～ P-4 まで記録再生実験を行ない、再生画像を並べた結果、記録用位相コード P-2 では若干選択性が劣るものの、概ねは、対角の位置の自己の位相コードのみで再生が行なわれる事が確認された。

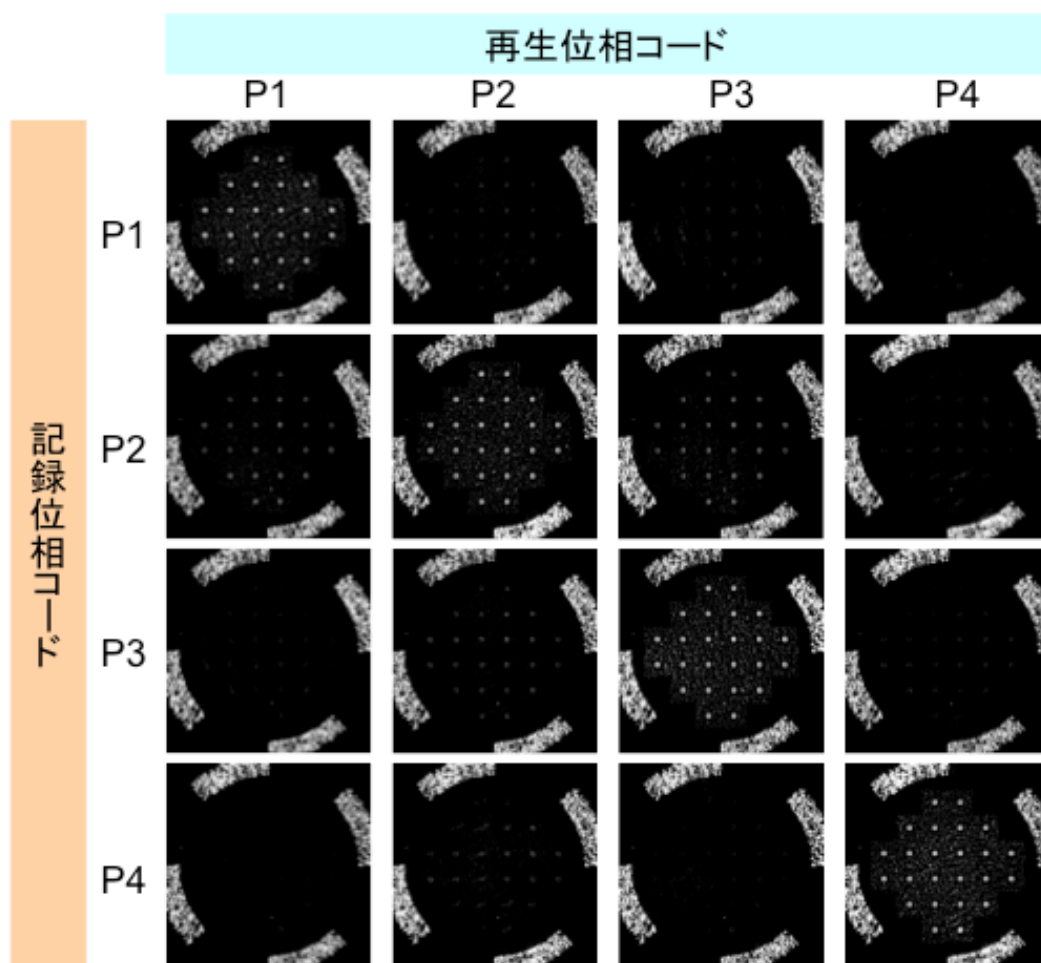


図 115 参照光の位相コード化による再生選択性の基礎実験結果

次に、4 値の位相多値階調ページデータを用いた、光フェーズロック方式による位相コード化多重記録と位相コード再生の実験を行なった。実験結果を図 1 1 6 に示す。記録のプロセスは、光フェーズロック方式光学系を用いて、同じ位置に、4 種類のコード化したデータ光と、共通に用いる 1 つのロック光を、順次多重記録した。再生のプロセスは、このあと直に、記録した位置を LED 光によりポストキュア処理し、そのあとで、再生位相コードとロック光を組み合わせた円環状の合成参照光で、

データ光の再生を行なった。4 値の位相多値階調データを正確に選り取るため、ロック光の位相のみを 16 段階に変化させながら（この間、再生位相コードは同じまま）再生画像を撮影した。他の再生位相コードでも、同様に 16 枚の再生画像を撮影した後、位相データの解析を行なった。

解析の結果、同じ位置に位相多値階調の 4 つのデータが多重記録されているにも関わらず、それぞれの再生位相コードで読み出されたデータは、それぞれ Data A ～ Data D であることが確認された。エラーレートの数値も図に示した通り、全て 10% 以下となっており、4 値の位相多値階調も忠実に再現されている事が確認された。

以上により、「光フェーズロックコリニア方式」による「位相多値階調ページデータ」を用いた「位相コード化多重」の記録再生に成功し、全ての基礎原理が実験により実証された。この基礎原理実証実験結果は、HVD フォーマットの上位互換性を実証したことにもなる。この成果を基に、更なる超高速／大容量のホログラフィック光データストレージの実用化に向けて研究開発を進展させて行きたいと考えている。

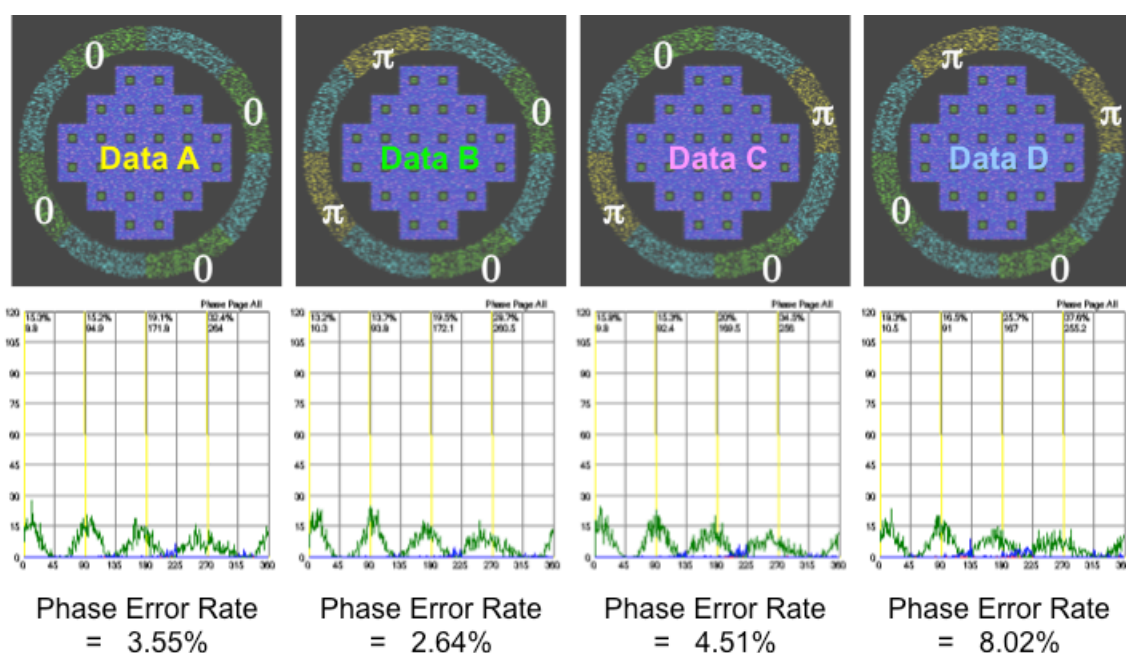


図 116 4 位相多値階調ページデータを用いた、位相コード化多重記録再生の実験結果

6.6 まとめ

ホログラフィーの大きな特徴の一つである「光の位相」を情報に加えて記録再生する「光フェーズロックコリニア方式」を考案した。コリニアホログラフィーの特徴であるコモンパス光学系を用いることで、実験系の空気の揺らぎや振動に起因する位相外乱の影響を、極力排除しながら、位相多値階調のページデータを安定に記録再生することが可能である。光フェーズロックコリニア方式の基本原

理について説明するとともに、強度と位相を独立に変調可能な実験光学系と、考案した記録再生用ページデータの構成について、どのように機能するのかを示した。実際に、光フェーズロック方式による位相多値階調の記録再生実験を行ない、1画素あたりに32階調（5 bit）もの情報を付加した状態でも、実用域のエラーレートで位相値が読み出せる事を、世界で初めて実験結果によって実証した。また、1画素あたりに最大256階調（8 bit）の位相多値情報を乗せた記録再生基礎実験を行ない、記録と再生の位相の関係がリニアに再現される事を実験的に確認した。更に、参照光を位相コード化して、同じ位置に複数の位相多値ページデータを多重記録する方法を考案した。実際に、4値の位相多値階調を有するページデータを用いて、同じ位置に4つのページを位相コード多重記録再生する基礎原理実証実験に、世界で初めて成功した。これまでのコリニア方式ではコリニアシフト多重が一般的な多重化の手法であったのに対して、光フェーズロックコリニア方式では、これに加えて、一本の光でありながら、記録位置を変えなくても多重記録再生が可能である事を原理的に示した意義は大きい。この事は、今後の超高速／高密度なホログラフィック光データストレージシステムの実用化開発に新しい方向性を示すものである。

なお、このページデータの構成と光フェーズロックコリニア方式による位相多値情報の記録再生は、国際標準規格として承認されたコリニア方式による HVD との上位互換性を保つことも可能であり、極めて実用に近い研究開発成果であると言える。

参考文献

- [1] J. Ashley and B. Marcus, "Constant-weight/lowpass modulation codes for holographic recording," IBM Research Report RJ 10089 (91905), October 1997.
- [2] J. Heanue, M. Bashaw and L. Hesselink, "Volume holographic storage and retrieval of digital data," *Science*, **265**, 749-752 (1994).
- [3] J. Ashley and B. Marcus, "Two-dimensional lowpass filtering codes for holographic storage," *IEEE Trans. Commun.*, **46**, 724-727 (1998).
- [4] G. W. Burr, B. Marcus, "Coding trade-offs for high-density holographic data storage," *Proceedings of SPIE, Advanced Optical Data Storage: Materials, Systems, and Interfaces to Computers*, **3802**, 18-29 (1999).
- [5] 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," *Opt. Lett.*, **22**(9), 639-641 (1997).
- [6] R.M. Shelby, J.A. Hoffnagle, G.W. Burr, C.M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R.K. Grygier,

- H. Gunther, R.M. Macfarlane, and G.T. Sincerbox, "Pixel-matched holographic storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, **22**, 1509-1511 (1997).
- [7] G. Burr, M. Neifeld, G. Barking, H. Coufal, J. Hoffnagle, and C.M. Jefferson, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Opt. Lett.*, **23**, 1218-1220 (1998).
- [8] 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," *Opt. Lett.*, **23**(4), 289-291 (1998).
- [9] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Commun.*, **85**, 171- (1991).
- [10] Y. Taketomi, J.E. Ford, H. Sasaki, J. Ma, Y. Fainman, and S.H. Lee, "Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing," *Opt. Lett.*, **16**, 1774- (1991).
- [11] M.C. Bashaw, A. Aharoni, J.F. Walkup, and L. Hesselink, "Cross-talk considerations for angular and phase-encoded multiplexing in volume holography," *J. Opt. Soc. Am.*, **B** (11), 1820- (1994).
- [12] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique," *Appl. Opt.*, **31**, 5700- (1992).
- [13] J. Lembcke, C. Denz, and T. Tschudi, "General formalism for angular and phase-encoding multiplexing in holographic image storage," *Opt. Mat.*, **4**, 428- (1995).
- [14] X. Yang, Y. Xu, and Z. Wen, "Generation of Hadamard matrices for phase-code-multiplexed holographic memories," *Opt. Lett.*, **21**, 1067- (1996).
- [15] S. Sinzinger and V. Arrizon, "High efficiency detour-phase holograms," *Opt. Lett.*, **22**, 928- (1997).
- [16] C. Alves, G. Pauliat, and G. Roosen, "Dynamic phase-encoding storage of 64 images in a BaTiO₃ photorefractive crystal," *Opt. Lett.*, **19**, 1894- (1994).
- [17] K.-O. Muller, C. Denz, T. Rauch, T. Heimann, and T. Tschudi, "High capacity holographic data storage based on phase-coded multiplexing," *Optical Memory & Neural Networks*, **7**, 1- (1998).
- [18] C. Denz, K.-O. Muller, T. Heimann, and T. Tschudi, "Volume holographic storage demonstrator based on phase-coded multiplexing," *IEEE J. of Sel. Top. in Quant. Elec.*, **4**, 832- (1998).
- [19] Y. Awatsuji, A. Fujii, T. Kubota and O. Matoba, "Parallel three-step phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.*, **45**, 2995-3002 (2006).

第7章

ホログラフィック3Dプリンター

7.1 はじめに

近年、3次元の物体を精密に造形する「3Dプリンター」が広く使われるようになり、試作設計の分野や医療分野等で広く活用されるようになってきた。しかし、これらはプリンターと言う名前がついているものの、一般のオフィスや家庭に置かれているコンピュータ周辺機器のように、薄いシートに印刷するようにして3次元立体画像をハードコピーできるような印刷装置ではない。

一方、薄いホログラム記録材料に部分的なホログラムを敷き詰めるように露光して、3次元立体映像をホログラフィックステレオグラムの技術を用いて印刷するシステムは、1992年に Yamaguchi らによって提案され、その後も性能の向上が図られてデモンストレーションが行なわれている[1-5]。また、特殊なビジネス用途や研究用途での利用を目的として比較的小型で露光速度も早い装置が開発されてきている [6-7]。これらのシステムでは、3次元立体画像の色を忠実に再現するためと、照明とホログラムの位置関係などから、反射によって映像を浮かび上がらせるリップマン型のホログラム露光形成が行なわれている[8]。しかし、リップマン型の部分ホログラムをホログラム記録媒体へ大面積に露光するためには、光学系の配置が大掛かりとなってしまうという問題がある。また、振動に対しての対策も未解決のままである。そのため、一般のオフィスや家庭に設置することが可能な商品にまでは至っていないのが現状である。

そこで、筆者の初期の研究である光磁気ホログラフィー[9]の知見を応用して考案した「偏光コリニアホログラフィー」[10]を発展させ、リップマン型の反射ホログラムの露光形成を高速に実現する「ホログラフィック3D（画像）プリンター」を考案した。このホログラフィック3Dプリンターは、デー

タストレージのようなデジタル的なページデータを情報光とするのではなく、アナログ的な画像情報をページデータとして情報光に用いる点に特徴がある。基本的なホログラムの露光技術は「コリニアホログラフィー」であるため、商品化の際には除振台を不要にするのみならず、光学ヘッドのみを高速に往復運動させて、超大面積な3次元立体映像をホログラフィックに高速露光印刷することも実現可能である。

この章では、まず、コリニアホログラフィーを応用したリップマン型の反射ホログラムの露光形成原理を述べる。また、フルパララックスの情報を持った3D画像をホログラフィックに記録再生する原理を説明する。次に、試作開発されたコリニア方式3次元プリンターシステム：CDP-1 (Collinear multi-Dimensional Printer system #1) のシステム構成と、光学系の構成について述べる。最後に、このCDP-1を用いて実際に露光印刷されたホログラフィック3D立体画像サンプル例を示し、コリニアホログラフィーがホログラフィック光メモリー以外の用途においても利用可能であることを示す。

7.2 コリニア方式によるリップマン型ホログラムの露光形成原理

コリニアホログラフィーにおいて、参照光と情報光を同じ光軸で同じ方向へ進行させながら対物レンズの焦点面付近で干渉させた場合には、透過型ホログラムが形成される。一方、同一の光軸であるが対向する方向へ進行させながら干渉縞を形成する場合には、反射型ホログラム、いわゆるリップマン型ホログラムが形成される。ホログラフィック3Dプリンターの場合には、波長選択性を用いて再生画像の色の再現性と解像度の向上を目指すために、リップマン型ホログラムの形成が望まれる。そのため、シンプルなコリニア光学系の構成でありながら、反射型のホログラムの記録を実現しなければならない。

そこで、図117に示すような、参照光と情報光の偏光方向を直交させた偏光コリニア方式の光学配置を考案した。ホログラフィック光メモリー用途と異なり、シフト選択性が不要である他、再生像をCMOSセンサーで検出する必要も無いことから、参照光は1本の平面波となっている点に特徴がある。また、参照光と情報光は必ずしも空間的に分離され無い配置でも良いため、この図においては情報光と重なるような位置から光を発している。対物レンズの手前に1/4波長板(QWP)を配置するのはこれまでと同じであるが、記録メディアと反射膜部分は分離しており、反射膜部分はQWPと反射型偏光ビームスプリッター(Wire Grid)および吸収体(Absorber)で構成されており、特定の偏光面の光だけ反射し、それに直交する偏光面の成分は透過した後で吸収されるような構造になっている。

このような偏光コリニア光学系を用いて、コリニアホログラフィーによるリップマン型ホログラムがどのように露光形成されるのかを、図118に模式的に示す。以下で、図示した各光線の偏光を追いながら説明する。

まず、物体光(Objective Beam)と参照光(Reference Beam)は、偏光面がそれぞれP波とS波

となって直交しており、往きの光路では干渉し合わないようになっている。そのため、対物レンズの手前に置かれた QWP を透過した後も、偏光面がそれぞれ右円偏向 (Right Circular) と左円偏向 (Left Circular) となるため、記録材料に到達した際にも原理的に干渉縞を形成しないようになっている。

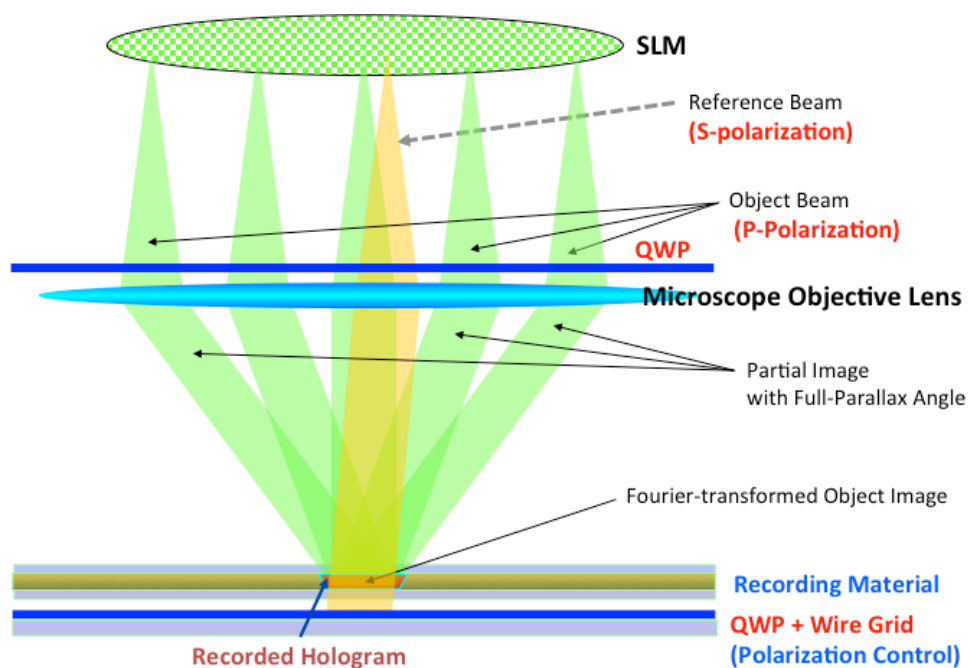


図 117 参照光と情報光の偏光方向を直交させた偏光コリニア方式の光学配置

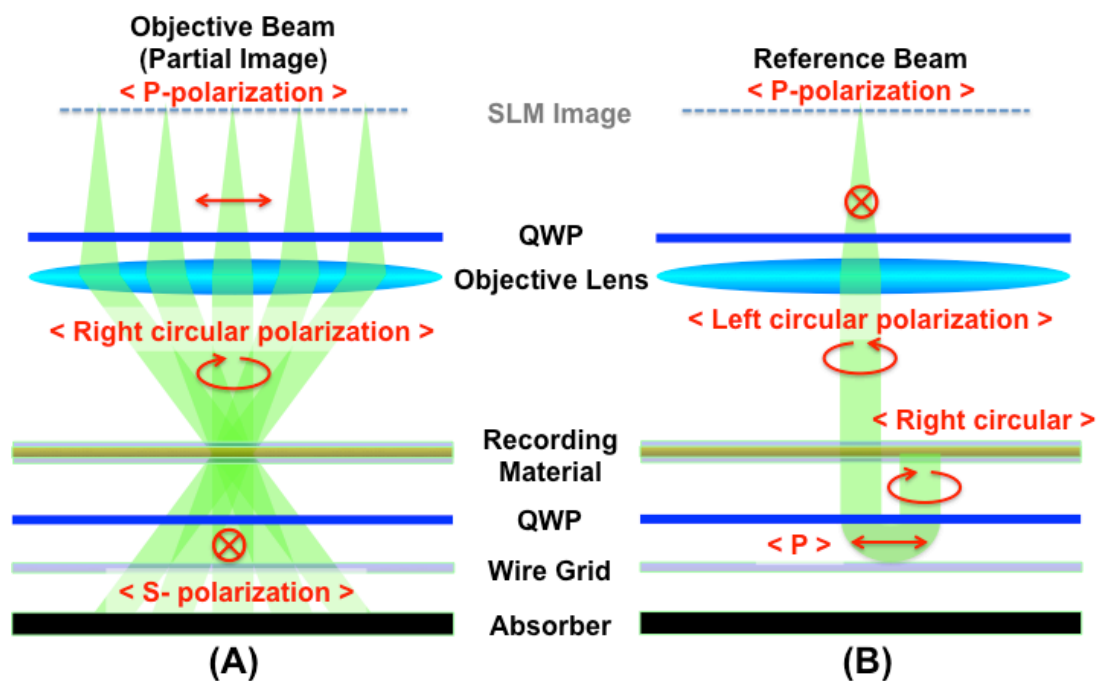


図 118 コリニアホログラフィーによるリップマン型ホログラムの露光形成原理

記録材料を透過した後は、もう一度 QWP を通過することで、偏光面がそれぞれ S 波と P 波と直交した直線偏光に戻される。その後に配置された Wire Grid によって S 波となった物体光は透過して Absorber で吸収される。一方、P 波となった参照光は Wire Grid で反射されて折り返され、QWP をもう一度透過することで右円偏向となり、記録材料に反対方向から入射される。この戻りの参照光は、対物レンズから記録材料に入射してくる物体光とは同じ右円偏向となっており、干渉縞が形成される。この時、お互いの光軸は対向する方向で交差するため、リップマン型の手帳が形成されることになる。なお、対物レンズから記録材料へ入射してくる自らの参照光とは偏光面が直交しているため、原理的に干渉縞は形成されない。

7.3 フルパララックス3D画像の手帳記録再生原理

空間光変調器に表示させる画素の位置と、対物レンズの焦点距離と開口数 (NA) を利用することによって、手帳記録材料へ、縦方向視差および横方向視差の全ての情報を含んだフルパララックスの手帳を記録再生することができる。その原理を、図 1 1 9 を用いて説明する。同図 (左) はリップマン型の手帳を記録する際の物体光のみを示したものであるが、表示する画素を A~E で表している。これらの画素は、対物レンズの入射瞳面に配置された異なる像高 (Image Height) を有している。すなわち、この像高に対応して幾何光学的に記録材料への入射角度 θ が決定されて露光される。手帳の露光が完了した後に、記録用参照光の照射方向と同じ方向から白色 LED の照明光を照射すると、リップマン型で形成された部分手帳から A~E に対応した光線が反射して再生される。

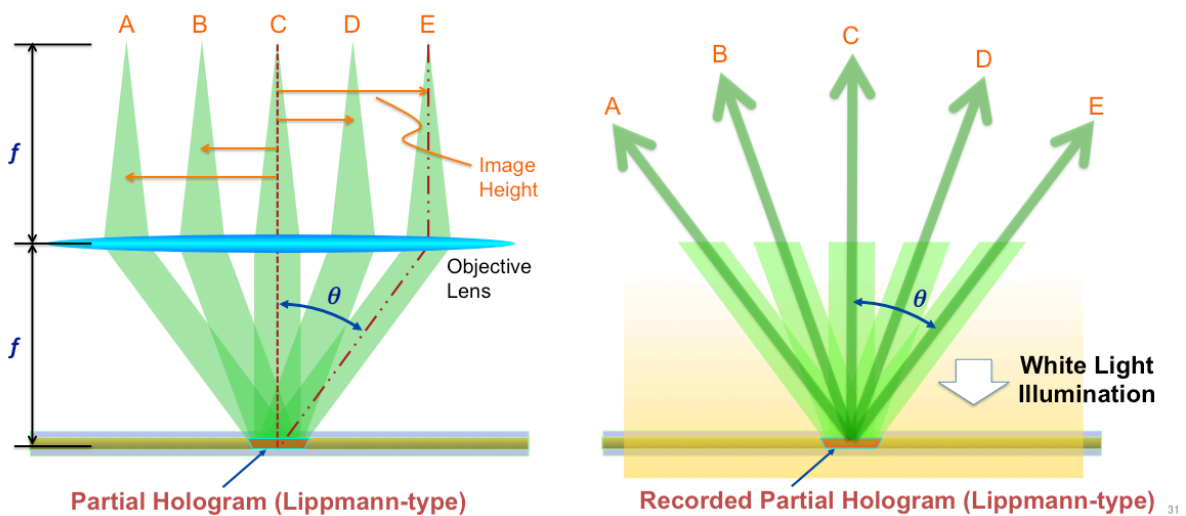


図 119 フルパララックス3D画像情報の手帳形成と再生原理

再生時には対物レンズは無いので、この A～E は空間に向かってそのままの角度で進んで行くことになる。A～E は、それぞれが視差情報を持った画像の部分的な光線成分となっているため、これを記録媒体へ敷き詰めるように記録することで、図 1 2 0 に示すように、それらの光線の組合せにより空間中に点光源を形成することができる。この結果として、記録媒体の手前や奥に表示される 3 次元立体画像が、ホログラフィックに再生されることになる。以上が、コリニアホログラフィーを用いて露光形成したリップマン型ホログラムからの、フルパララックス 3D 画像の再生原理である。

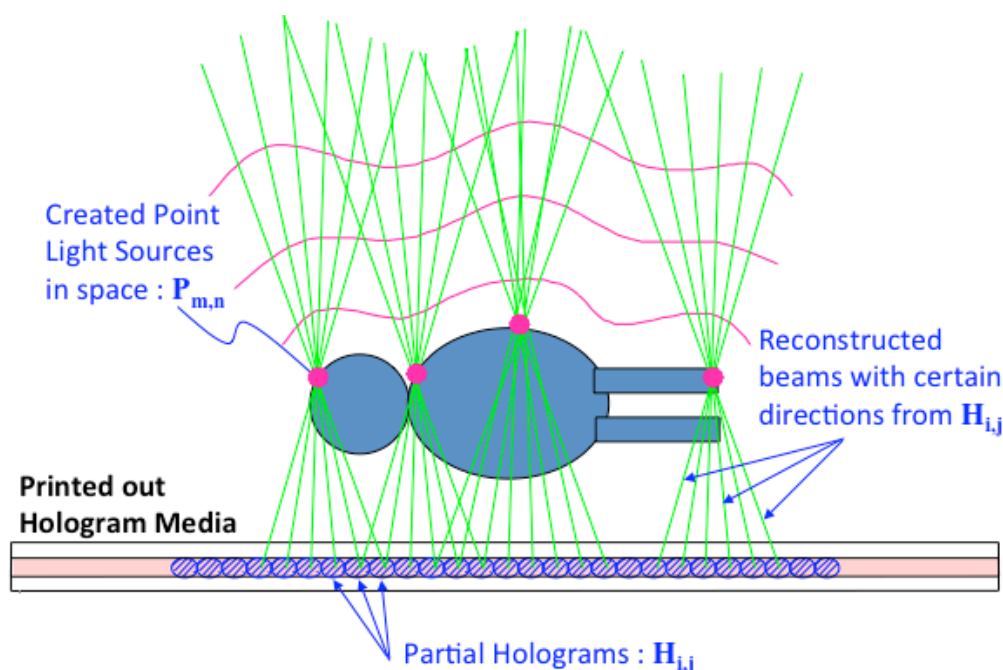


図 120 部分ホログラムの集合による空間点光源生成の原理図

7.4 ホログラフィック3Dプリンターシステム：CDP-1

上述の原理を基にして、実際にコリニア方式を応用した 3 次元画像プリンターシステム：CDP-1（Collinear multi-Dimensional Printer system #1）を試作開発した。図 1 2 1 にシステムの外観とシステム構成のブロック図を示す。また、図 1 2 2 に光学系の構成模式図と、光学系の外観および主要部の写真を示す。記録には波長 532nm の Q-スイッチパルスレーザーを用いた。過干渉距離が極端に短いため、物体光と参照光を PBS1 で分けた後に、参照光の光路長を PM1 と PM2 というペアの 45° ミラーを用いて光路長を補正した。情報光表示用の空間光変調器には DMD を用いた。DMD の手前に配置した QWP1 は、DMD のガラスに内在している複屈折を補正して、偏光コリニア光学系における光利用効率を向上する目的で挿入されている。情報光と参照光は PBS2 に入射されることによって、偏光面の直交する同軸の参照光と情報光となり、対物レンズに導かれて干渉縞が露光形成される。

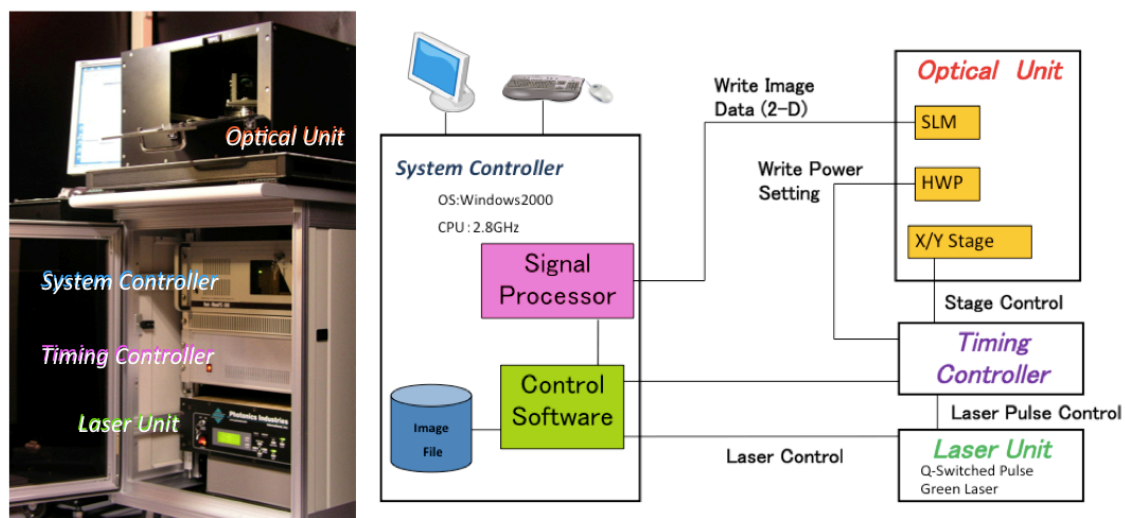


図 121 コリニア方式3Dプリンターシステム：CDP-1の外観とシステム構成ブロック図

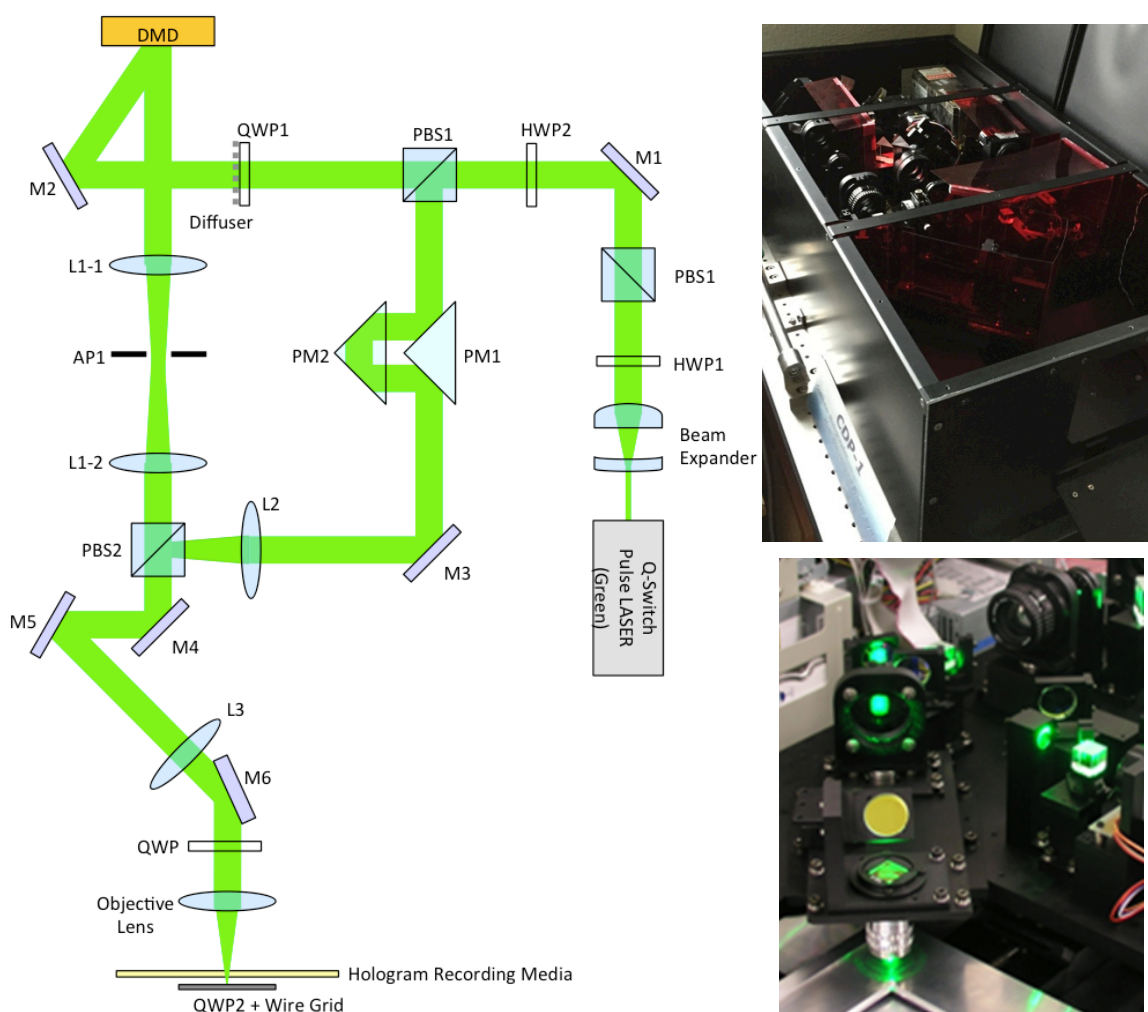


図 122 CDP-1の光学系構成模式図と Optical Unit および光学系主要部の外観

部分ホログラムごとに記録するフルパララックス情報を担持したページデータは、予めレンダリングとスライス&ダイス処理等が施され、DMD に表示される XGA サイズの画像としてシステムコントローラの中のハードディスク（Image File）に格納されており、X/Y Stage に同期して読み出されて、図 1 2 3 に模式的に示すように、記録媒体に敷き詰められるように記録される。

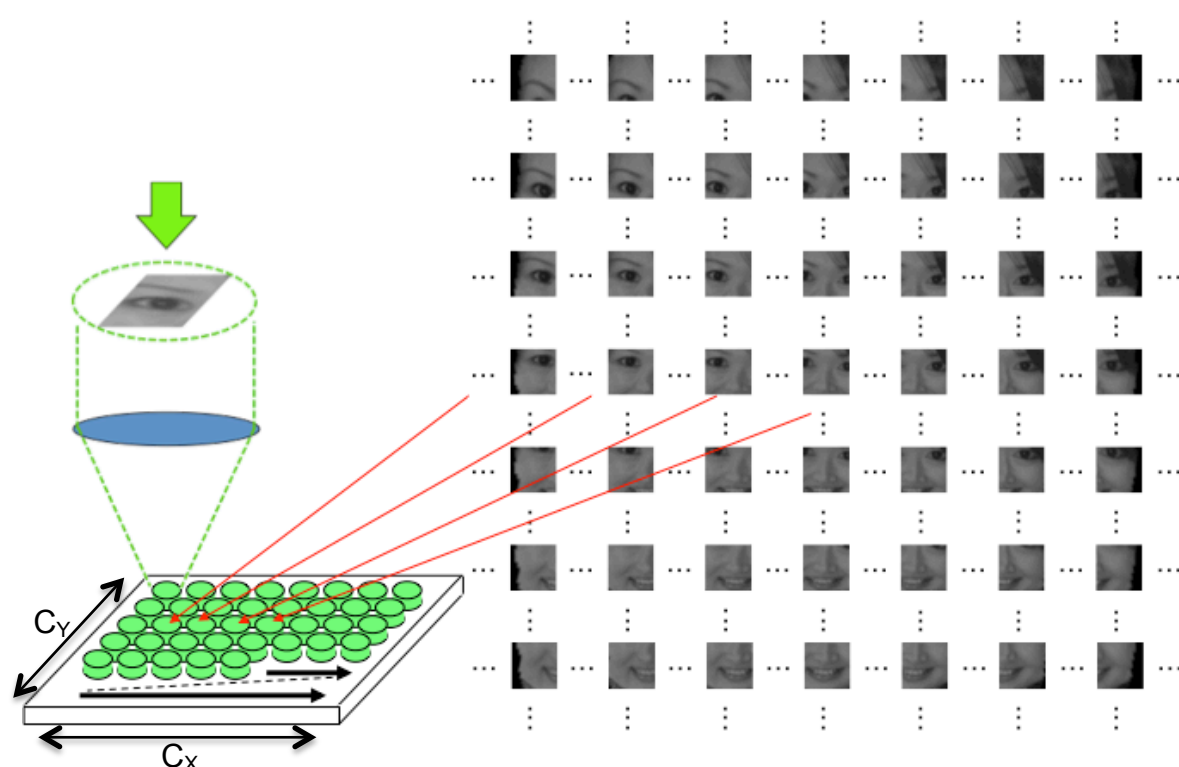


図 123 フルパララックス情報を担持した部分ホログラムの敷き詰め露光（模式図）

7.5 CDP-1 による3D 画像の露光印刷

CDP-1 を用いて、実際にホログラフィック3D 立体画像の露光印刷を行なった。図 1 2 4 は、露光形成したホログラムを顕微鏡観察した写真である。部分ホログラムのサイズは直径約 $500\mu\text{m}$ であるが、ホログラムの露光ピッチは $300\mu\text{m}$ となっている。これは、部分ホログラムごとの境界線が再生画像に現れないようにするために、フォトリソの多重露光性能を利用した多重記録の一種である。しかし、参照光は1画素から生成されたような一本の平行光であるため、シフト選択性を全く持たない特異なコリニアシフト多重記録であると言える。

実際に露光印刷したホログラムの観察結果の一例を図 1 2 5 に示す。記録されたホログラムは縦 64 個×横 64 個のホログラムである。これを、水平3方向×垂直3方向から視差を変えて写真撮影し、撮影画像を並べて示したものである。視差を変えると表示された画像が変化することから、フルパララ

ックスの3次元的な立体画像が露光形成されていることが確認された。

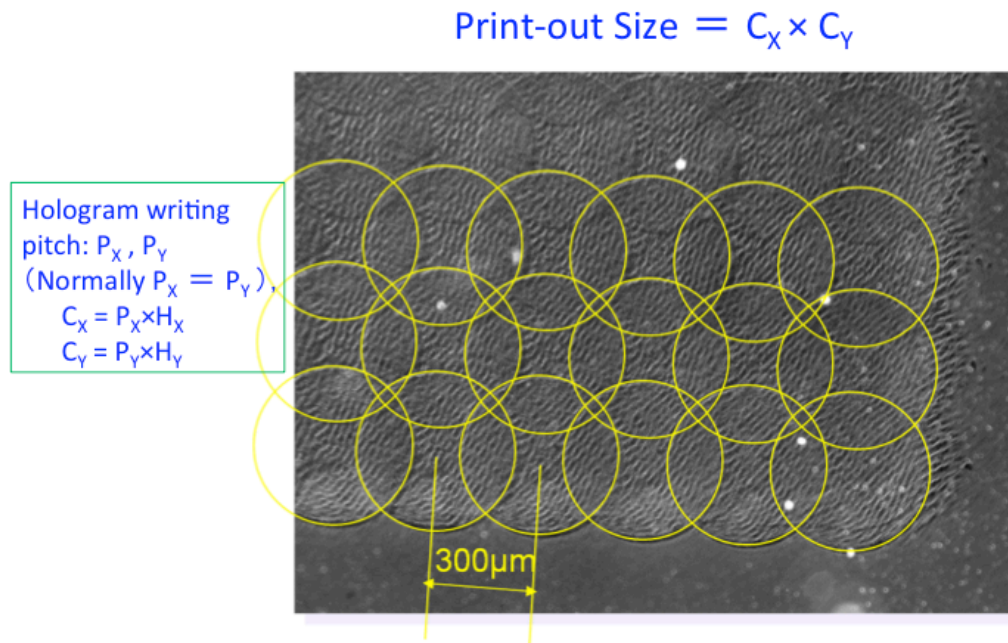


図 124 コリニアシフト多重方式で露光形成した部分ホログラムの顕微鏡写真

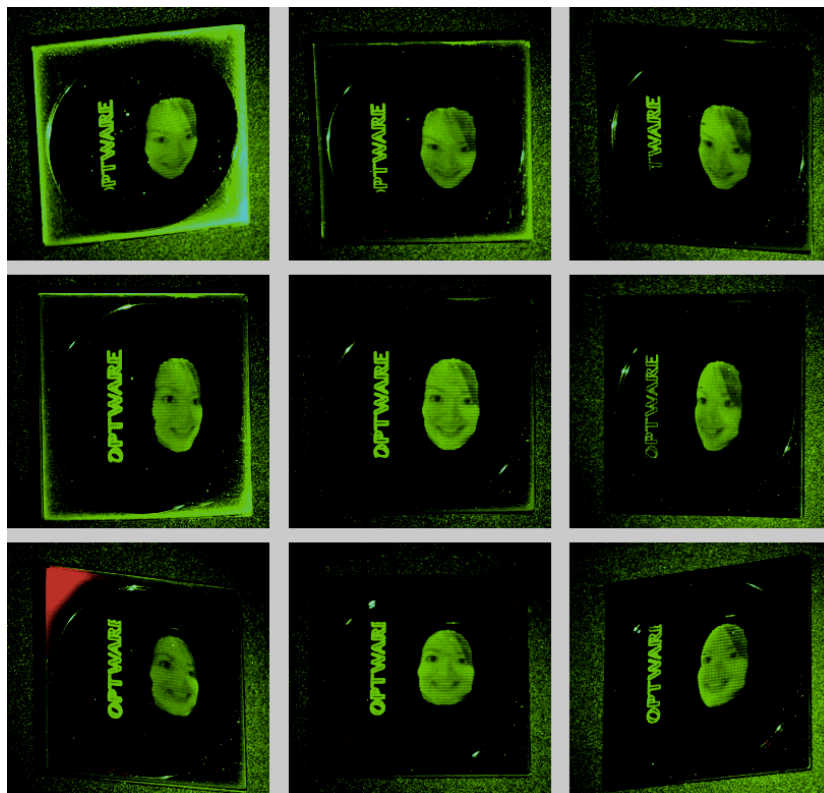


図 125 露光印刷ホログラムの観察結果（水平3方向×垂直3方向から写真撮影）

更に、ホログラムピッチを $200\mu\text{m}$ 以下にし、縦 512 個×横 512 個のホログラムで露光印刷したサンプルの画像観察例を図 126 に示す。露光サイズは $90\text{mm}\times 90\text{mm}$ で、連続移動するホログラム記録媒体に対して 20mm/sec の速度で部分ホログラムをダイナミックに露光印刷した。観察の結果から、ホログラフィック 3D 画像の露光印刷の場合でも、コリニアシフト多重によって高密度な多重露光を行なった結果、より高精細な 3D 再生画像が得られることが示唆された。

実用化に向けて、視野角の向上と、カラー露光印刷の実現が、今後の課題である。

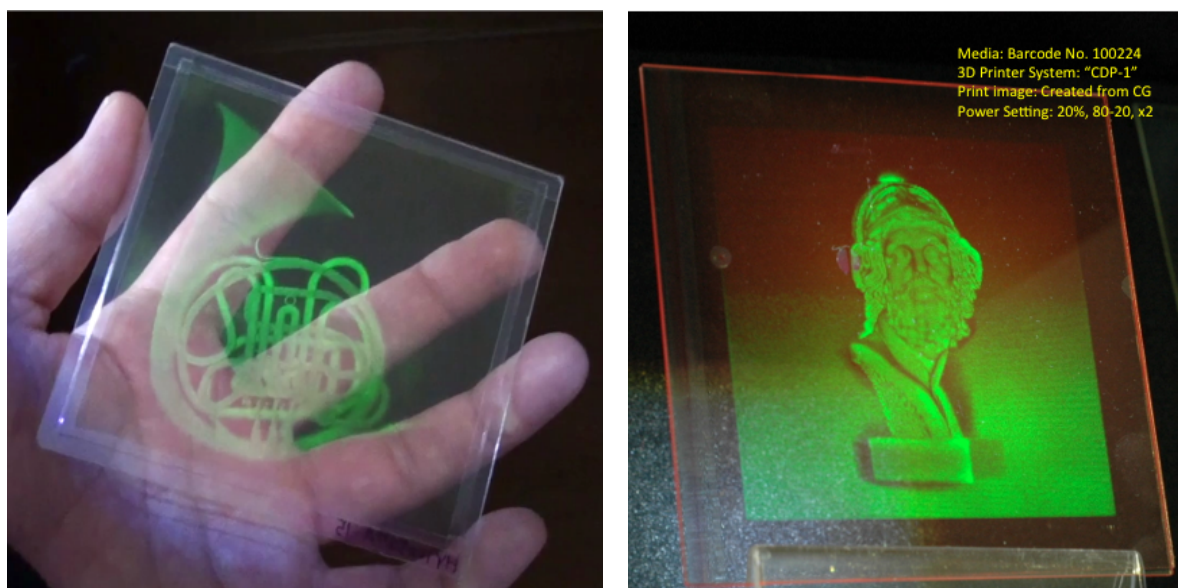


図 126 コリニアシフト多重による高精細 3D ホログラム露光印刷サンプル例

7.6 まとめ

物体光と参照光の偏光方向を直交させ、往路と復路の偏光を制御した偏光コリニアホログラフィー技術によるリップマン型ホログラムの露光形成原理について述べた。また、この技術を用いて、フルパララックスの情報を持った 3D 画像をホログラフィックに露光印刷する、ホログラフィック 3D (画像) プリンター : CDP-1 を開発した。相対速度 20mm/sec で連続移動する記録媒体に対して、 $200\mu\text{m}$ 以下のピッチで部分ホログラムを露光印刷したところ、高解像度の 3D 立体画像の露光印刷が可能である事が分かった。部分ホログラムのサイズは $500\mu\text{m}\phi$ であることから、ホログラフィック 3D プリンターにおいてもコリニアシフト多重による記録は高解像度な画像の記録再生に有効であることが示唆された。

本研究開発を通して、コリニアホログラフィーがホログラフィック光メモリー以外の用途においても利用可能であることが示された。

参考文献

- [1] M.Yamaguchi,N.Ohyama, and T. Honda, “Holographic three-dimensional printer new method,” Applied Optics, voL 31, no. 2, p. 217, Jan. 1992.
- [2] M. Yamaguchi, H. Endoh, T. Honda, and N. Ohyama, “High-quality recording of a lull-parallax holographic stereogram with a digital diffuser.,” Optics letters, vol. 19, no.2,p. 135, Jan. 1994.
- [3] S. Mamyama, Y. Ono, and M Yamaguchi, “High-density recoiriinfg of lull-parallax holographic stereogram,” Proc. ofSPIE, voL 6912, p. 69120N-10, Feb. 2008.
- [4] F. Yang, Y. Murakami, and M. Yamaguchi, “Digital color management in full-color holographic three-dimensional printer.,” Applied optics, vol 51, no. 19, pp. 4343-52, JuL 2012.
- [5] T. Utsugi and M. Yamaguchi, “Reduction of the recorded speckle noise in holographic 3D printer,” Optics Express, voL 21, no. 1, pp. 662-674,2013.
- [6] 木原信宏, 白倉明, 馬場茂幸, “高速ホログラムポートレイトプリントシステム,” 3次元画像コンファレンス (1998).
- [7] 白倉明, 木原信宏, 馬場茂幸, “即時ホログラフィック 3D プリント技術,” ホログラフィックディスプレイ研究会会報, **18-3** (1998).
- [8] G. Lippmann, J. de Phys., **3** (3), 97-107 (1894).
- [9] 堀米秀嘉, 井上明, 見山友裕, 藤井壽崇, 鈴木新一, 草鹿履一郎, 徳島忠夫, 松本誠二, “TbFe 非晶質薄膜を用いた高密度磁気ホログラム記録,” 電子通信学会研究会, CPM83-85, 55-60 (1984).
- [10] Hideyoshi Horimai, Pang Boey Lim, Lambertos Hesselink, and Mitsuteru Inoue, “Volumetric Optical Disk Storage with Collinear Polarized Holography,” in Technical Digest of ISOM/ODS’02, TuP26, 43-44 (2002).

第8章

総括

本研究は、たった一つの対物レンズを通してホログラムの記録および再生を行なう方法として考案されたコリニアホログラフィーについて、その基礎原理の実証から応用開発までを目的として行われたものである。得られた成果を以下にまとめる。

コリニアホログラフィーの原理

- 参照光と情報光を一つの同じ光軸上に配置して、たった一つの対物レンズを通して記録再生を行う「コリニアホログラフィー」の原理を考案した。この原理に基づき、実際にページデータを用い、コリニア方式によるホログラムの記録再生実証実験に、世界で初めて成功した。
- コリニアホログラフィーを光メモリーへ応用して実用化するための基本コンセプトを検討し、ホログラム技術と光ディスク技術を融合させたコリニア方式の基本光学系を確立した。また、情報光のまわりに放射状の輪帯参照光を配置したコリニア方式におけるページデータの基本形を考案し、3-16 Modulation Coding によるデータページフォーマットを設計した。
- コリニア方式において記録媒体中に形成される体積的な干渉縞を、数値計算シミュレーションにより可視化する事に成功した。また、空間光変調器として DMD を用いたコリニア方式光学系において、体積的な記録媒体の厚み方向への均質な干渉縞形成技術を確立した。

高密度記録再生方法の検討

- コリニア方式の記録再生特性を詳細に評価／解析するための実験装置：S-VRD を立ち上げ

た。この装置を用いて、コリニア方式におけるシフト選択特性を評価し、シフト量 $3\mu\text{m}$ 以下の急峻な特性を有することを発見した。実際に、コリニアシフト多重記録再生実験を行ない、 $3\mu\text{m}$ ピッチで多重記録されたホログラムの中から任意のページデータを読み出す事に、世界で初めて成功した。

- 記録再生によってデータページに発生するバーストエラーの原因を、数値計算シミュレーションによる手法を用いて、解析を行なった。コリニア方式の記録再生をピクセル毎の単純な干渉縞形成モデルとし、数値計算シミュレーションを行なったところ、参照光パターンに特有のノイズであることを突き止めた。この結果から、放射状の参照光パターンの有効性が裏付けられた。
- コリニア方式におけるシフト選択性の特徴について、単純な数値モデル化によるシミュレーション解析を試みた。シフトに伴う再生信号の変化は、同心円の参照光による 0 次の Bessel 関数の重ね合わせで表す事ができる事が示された。この結果から、実際のシフト選択性の測定結果にみられる挙動が、数値計算シミュレーションの解析結果により定性的に説明がつく事が示された。

コリニア方式のシステムマージン

- ホログラフィック光ディスクドライブシステム構築のため、コリニア方式特有のシステムマージンを選定し、世界で初めて、実験による評価を行なった。フォーカスおよびトラッキングマージンは、DVD のサーボ規格値より 6 倍以上あることが分かり、光サーボを応用した記録再生の実現可能性を示した。
- 対物レンズとページデータの表示位置の許容値、イメージプレーンマージンは、 $\pm 200\mu\text{m}$ 程度であり、光ディスクの面ぶれ量等の設計値が求められた。記録媒体の傾きのチルトマージンは約 0.18 度と従来方法より広い値であった。現在の光ディスクの製造技術で量産可能なレベルであることを示した。
- 記録再生時の波長シフトに関係する波長マージンは約 3nm であり、同じ媒体厚みの二光束干渉法より 3 倍もマージンが大きいことを明らかにした。そこで、世界で初めて、マルチモード発振した青色半導体レーザーを用いたコリニア方式によるホログラム再生実験を行ない、 $\text{BER}=10^{-3}$ のオーダーでの再生に成功した。
- これらにより、コリニア方式によるホログラフィック光ディスクドライブシステムの設計指針を、マージンの観点から明確にした。

HVD への On the Fly 記録再生

- 記録媒体のプリフォーマットピットからの散乱がホログラム再生像へノイズを発生してしまいう問題を、波長選択反射膜を導入することで解決した。この記録媒体構造を利用し、世界初のコリニア方式によるホログラフィック光ディスク：HVD (Holographic Versatile Disc) を完成させた。
- コリニア方式の技術を全て融合して、コリニア方式ドライブシステムのプロトタイプ機：ES-1 (Engineering Sample #1) を完成させた。二波長に対応した専用の対物レンズと、フォーカス&トラッキングサーボ用高精度2軸アクチュエーターを開発し、コリニア方式の光ヘッドを実現した。また、ペアミラーによる光路補正機構を応用した分離可動型ホログラム光学系を考案し、世界で初めて、高速なランダムアクセス機能を実機に搭載した。
- CD や DVD で利用されている光サーボ技術をホログラム技術と融合させ、回転する光ディスクへのダイナミックな記録再生を、世界で初めて実現した。300 rpm で連続回転する HVD の全面にわたり、On the Fly でページデータをホログラフィックに記録再生することに、世界で初めて成功し、ホログラフィックデータストレージの実用化可能性を示した。

光フェーズロックコリニア方式

- コリニアホログラフィーの特徴であるコモンパス光学系のメリットを活かし、光の位相多値階調情報を安定して記録再生する、光フェーズロックコリニア方式を考案した。基本原理を検討するための基礎実験光学系を構築するとともに、記録再生用ページデータの構成も設計した。
- 実際に、光フェーズロック方式による位相多値階調ページデータの記録再生実験を行ない、1画素あたりに32階調(5 bit)もの情報を付加した状態でも、実用域のエラーレートで位相値が読み出せる事を、世界で初めて実験により実証した。
- 参照光を位相コード化して、同じ位置に複数の位相多値ページデータを多重記録する方法を考案した。実際に、4値の位相多値階調を有するページデータを用いて、同じ位置に4つのページを位相コード多重記録再生する基礎原理実証実験に、世界で初めて成功した。

ホログラフィック3Dプリンター

- 物体光と参照光の偏光方向を制御した偏光コリニアホログラフィー技術により、リップマン型ホログラムの露光形成原理を考案した。この技術を用いて、フルパララックスの情報を持った3D画像をホログラフィックに露光印刷する、ホログラフィック3D(画像)プリンター：CDP-1を開発した。
- 相対速度 20mm/sec で連続移動する記録媒体に対して、200 μ m 以下のピッチで部分ホロ

グラムを露光印刷し、高解像度の3D立体画像の露光印刷に成功した。これにより、ホログラフィック3Dプリンターにおいて、コリニアシフト多重による記録が高解像度な画像の記録再生に有効であることを示した。

- 本研究を通じて、コリニアホログラフィーがホログラフィック光メモリー以外の用途においても利用可能であることを示した。

結論

参照光パターンと情報光パターンを同じ空間光変調器（SLM）に表示することで、本研究の目的である「たった一つの対物レンズを通してホログラムの記録および再生を行なう方法」を実現できることを見出し、コリニアホログラフィーの発明となった。参照光と情報光が一つの同じ光軸上を同じ光路で伝搬するため、コモンパス光学系となり、光ディスクで広く利用されている光サーボ技術の融合が可能となった。これにより、連続回転するホログラム記録媒体に対しても20nmオーダーのメカニカル精度で干渉縞の記録再生を実現することが可能となった。これにより、本研究で掲げたもう一つの目的である「実用的なホログラフィック光データストレージシステムにまで発展させること」も、コリニア方式ドライブシステムのプロトタイプ機：ES-1の完成にまで到達し、本研究の目的は達成された。なお、コリニアホログラフィーを用いたHVDは、スイスに本部を置く国際標準化機関であるEcma Internationalにおいて、2007年5月に世界標準規格として承認された（図127）。これは、ホログラフィック光メモリーの研究開発の歴史上初めての事であり、実用化と普及に向けた大きな一歩である。

また、コモンパス光学系の利点を生かし、光の位相多値階調情報を安定して記録再生する、光フェーズロックコリニア方式の基本原則を考案し、1画素あたりに32階調（5 bit）もの情報を付加した状態でも、実用域のエラーレートで位相値が読み出せる事を、世界で初めて実験により実証した。これを発展させ、参照光を位相コード化して多重記録する方法により、位相多値階調ページデータの位相コード多重記録再生にも、世界で初めて成功した。この成果は、今後のホログラフィック光メモリーの実用化開発に、新たな方向性を示すものである。

更に、物体光と情報光の偏光方向を制御したコリニアホログラフィー技術による、リップマン型ホログラムの露光形成原理を考案した。この技術を用いて、ホログラフィック3D（画像）プリンター：CDP-1を開発し、フルパララックスの情報を持った高解像度の3D立体画像の露光印刷に成功した。

以上の研究成果により、コリニアホログラフィーは、ホログラフィック光メモリーを真の実用化に導く有用な技術である事が示されたのみならず、ホログラフィック3Dプリンターに代表されるような、他のホログラフィー応用分野でも利用可能であることが具体的に示されたと考えている。

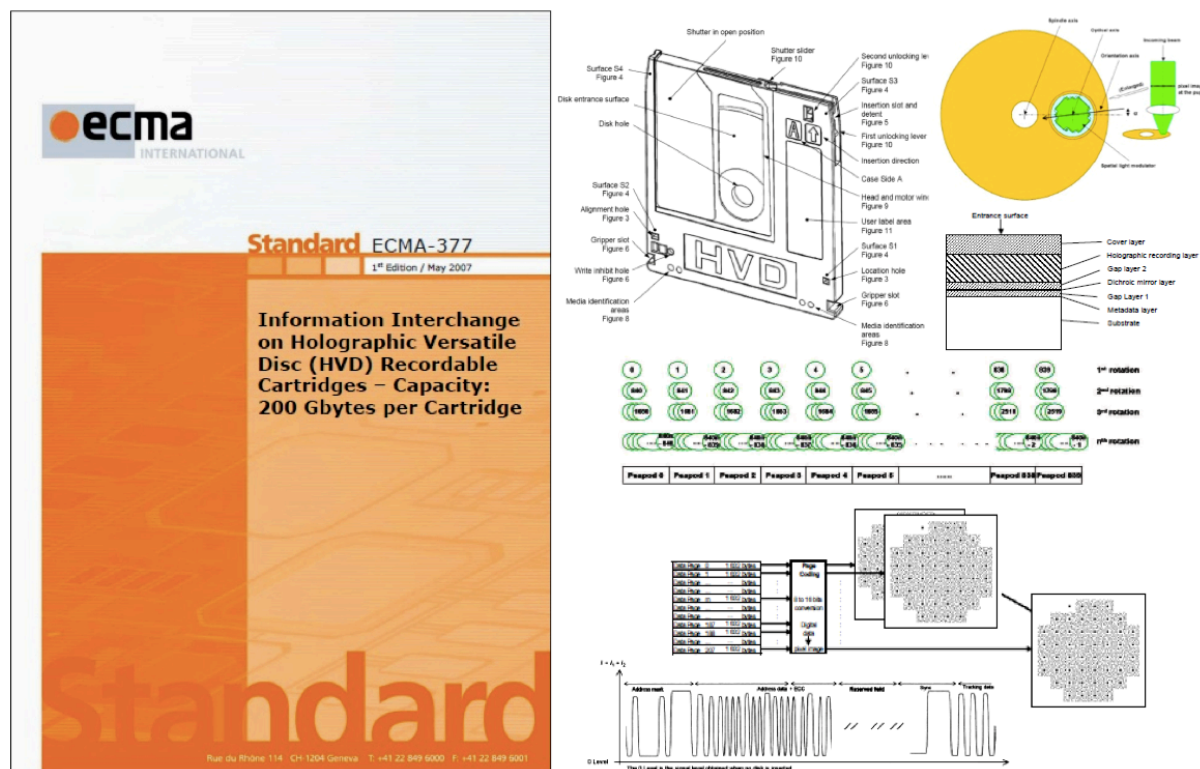


図 127 世界標準規格ドキュメント ECMA-377（表紙）と HVD 記載内容の抜粋

今後の展望

アーカイブ用途におけるホログラフィック光データストレージシステムの実用化を実現するには、まだまだ多くの技術課題をクリアしなければならない。そこで、本格的な製品化に向けて、今後、どのように研究開発を進めるべきかについて、技術的な指針と展望を述べる。

（１）最も大きな難問は、「記録再生の温度マージンの大幅な拡大」であると考えている。コリニア方式は、広い波長マージンを有することが本研究で明らかとなり、それにより温度マージンも二光束干渉法よりも広いことは予想される。しかし、コールドストレージとして実際のフィールドで利用されるためには、少なくとも、通常のストレージシステムと同等の使用温度範囲でも記録再生が可能であることを、実験データで示す必要がある。

この難問を解決する鍵は、ページデータの位相やサイズを微妙に調整する、アダプティブなコリニア方式の研究開発に有ると考えている。コリニア方式では、ピクセルの位置で対物レンズから集光される k ベクトルが規定されるため、これを利用して **Bragg Degeneracy** を発生させるなどして、記録材料のもつ温度変化による屈折率依存性を補正する方法などの開発が期待される。

（２）記録材料の $M/\#$ を、できるだけ消費しない手法の多角的な検討が必要である。将来的には、

ディスク当たり1ペタバイトに迫る高密度記録が求められるため、その実現に向けた新たな手法の考案も必要である。

本研究で行なった、光フェーズロックコリニア方式のように位相多値情報を有効に活かすとともに、高速な検出アルゴリズムと専用コンポーネントによる実用的な手法を確立する。また、アイデア段階ではあるが、空間周波数領域、すなわち記録材料中でウェーブレットを利用した情報量の効率的な削減方法の検討を行なうなど、理論的な解析アプローチを導入しながら実現していきたいと考えている。

(3) これらに組み合わせて、当然ながら、記録材料の更なる高感度化と低ノイズおよび高分解能化に向けた改善も継続的に研究開発を推し進めなければならない。

(4) 更に、光学素子表面からの乱雑光を低減し、微弱な回折効率の再生ページデータでも高いSNRで読み出す緻密な光学系の設計開発検討も必要である。

(5) ページデータの更なる高密度化、更に、記録再生用の高出力で小型かつ安価なレーザー光源の実現も望まれる。

(6) 最終的には、ハードディスクと同じレベルの超小型コリニア方式光学ヘッドを、半導体とホログラフィックなHOE技術を融合してモノリシックに実現しなければならない。

(7) 今後のインターフェースの高速度化と、データ処理の高速化に合致するハードウェアの研究開発も必要である。

これらの実現には、全世界の英知を集めた多くのブレークスルーが必要であり、膨大な研究開発費用が必要であることは想像に難くない。

そのためには、データストレージ以外の分野においても、ホログラムおよびホログラフィーを広範に応用した実用化事例、特に商品化の事例を、できる限り多く生み出すことが必要であると考えている。例えば、本論文では、コリニアホログラフィーの持つ特徴を活かし、ホログラフィック3Dプリンターへ応用したが、これまで不可能とされていた技術を可能にすることで、ホログラフィーを応用したマーケットの創造が実現する。そうすることで、ホログラム技術がより一層喚起され、研究開発が活性化されるものと期待している。

その上で、再度、これまでの研究開発の知見を有機的に融合させることで、上記に示した技術的課題が克服され、真に実用的なホログラフィック光データストレージの製品化が実現するものと確信している。今後も、ホログラフィーの持つ無限の可能性を引き出すべく、研究開発を推し進めていく所存である。

付録 A

偏光コリニアホログラフィー

A.1 はじめに

本研究開発の開始当初、デジタル体積ホログラフィーの最新研究動向を調査したところ[1-4]、実用的な超高速・大容量の光データストレージを実現するためには、残された幾つかの課題にブレークスルーを与える必要があることが明らかとなってきた。その中でも、光ディスクのように[5]、たった1つの対物レンズを用いてホログラムの記録再生を行うことができれば、光学系は極めてシンプルになるとともに、光ディスクの技術をホログラム技術に融合させる事が可能となる。このような観点から、参照光と情報光が平行に進行するにもかかわらず対物レンズの光軸に同軸で入射した後に記録媒体上で干渉縞を形成し、かつ、ホログラムの再生時には再生用参照光と再生された情報光が光学的に効率よく分離されるホログラフィック光学系の創造が必要であるという結論に至った。

この章では、上記の観点に基づいて考案された、初期のコリニア方式でもある「偏光コリニアホログラフィー技術」について述べる。偏光コリニアホログラフィーの発想の原点は、更に、1982年～1984年の筆者の研究内容「光磁気ホログラフィー技術」にまで遡るため、磁気光学効果を利用した偏光分離型のホログラム再生原理について概説し、次に、この偏光分離再生原理を複合旋光板という光学素子を用いて光学的に実現した偏光コリニアホログラフィー技術について、光学系の構造と偏光のコントロールを中心に述べる。最後に、基礎原理実証実験結果と得られた知見を示す。

A.2 光磁気ホログラフィーと偏光分離再生原理

1948年 Dennis Gabor によってホログラフィーの原理が考案された時には、その記録再生系の配置

は光軸が同一のインライン型の光学配置であったことは良く知られている[6]。しかし、このような配置では再生像に再生用参照光(プローブ光)が重なり合ってしまう再生情報の S N R を著しく低下させてしまう。この問題点を解決した光学系配置が 1962 年 Leith と Upatnieks により提案された「2 光束干渉法」である[7]。しかしながら、この光学系の構成がホログラフィック・データストレージの実用化を阻む最後の大きな難関となっている。なぜなら、C D や D V D ではシンプルな 1 光束の光学系であるがゆえに安価な光学ピックアップの製造が可能であるのに対し、再生用参照光(プローブ光)とそこから再生される再生像を分離する手段が Off-Axis による空間分離方式では必然的に複雑な光学系になってしまうからである。従って実用化への最大のブレークスルーは、参照光と情報光の光軸が角度を持たない同軸の光学配置でホログラムが記録可能であり、かつホログラムの再生時にも同軸で進行する参照光と再生光とを何らかの形で(例えば偏光により)分離可能なホログラム記録再生光学系の創造にあると考えた。この鍵を握っていたのが 1980 年の初め頃に筆者が研究していた光磁気ホログラフィーであった [8]。

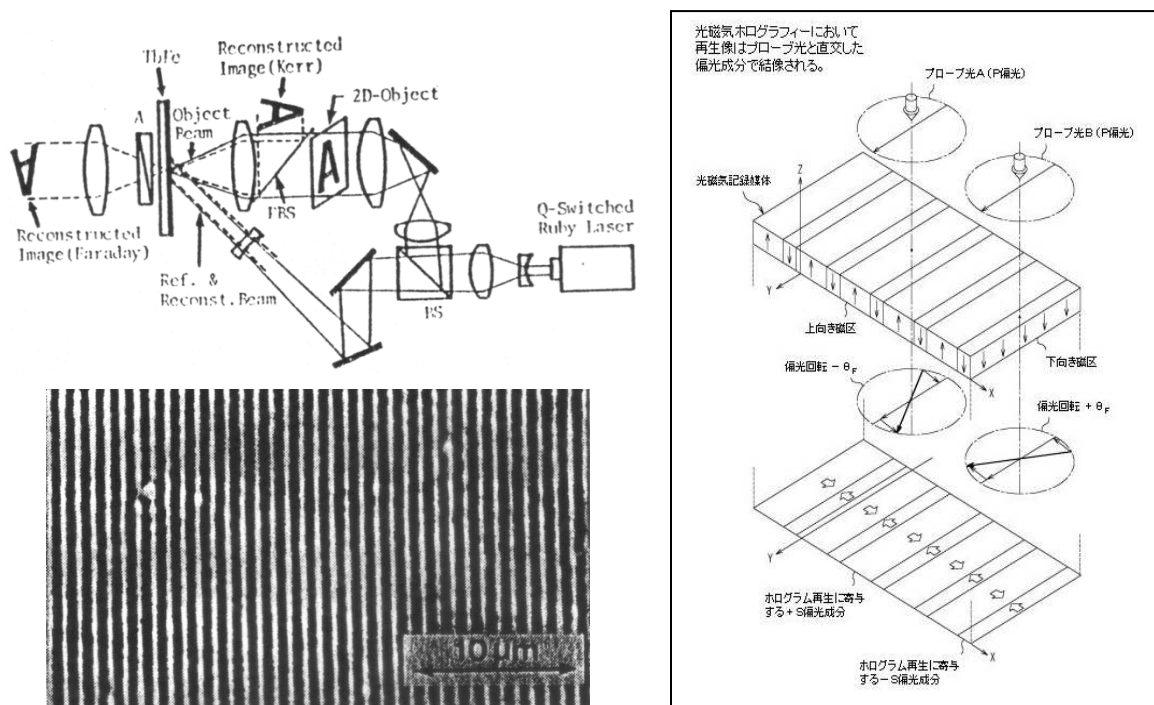


図 128 光磁気ホログラフィー光学系、磁気グレーティング、及び 直交偏光成分の回折原理

光磁気ホログラフィーでは、図 1 2 8 に示すように、記録された磁気グレーティングからのホログラム像再生は、磁気光学効果(カー効果、あるいはファラデー効果)によって生じる偏光面の回転方向成分同士の干渉に起因して行なわれる。そのため、再生像の偏光面は、照射する参照光の偏光面に対して、完全に直交している。従って、光磁気材料へのホログラム記録再生では、参照光と再生光を

偏光によって容易に分離することが可能であるため、参照光と情報光の角度を全く同じ光軸方向へ進むインライン型の光学配置においても、極めて高いS N Rを得ることができるという特徴を有する。

A. 3 偏光コリニアホログラフィーの基本原理

光磁気ホログラフィーでは、記録媒体が強磁性体であり、そのため記録媒体自体の持つ磁気光学効果（カー回転角）により、物体光と参照光の偏光による分離が容易に実現したが、体積的なホログラム記録に用いるフォトポリマー材料では偏光の回転は起こらない。そこで、なんらかの光学素子を光路中に挿入することで、同様の現象が作り出せないものかと模索した。試行錯誤の結果、光線を光軸に対して2分割し、それぞれの光線に逆の旋光性を付与する事で、光磁気ホログラフィーにおける直交偏光分離再生と同様の原理を実現する方法を見出した。これが、偏光コリニアホログラフィー記録再生方式である。旋光性を与える素子として、水晶のc軸に対して垂直にカットした旋光板[9]を用いるが、光軸に対して対称な2分割のエリアにそれぞれ逆の旋光性を付与するために、右水晶と左水晶から切り出した右旋光板と左旋光板を、端面研磨して接着した複合旋光板(Gyrator)を用いた。この複合旋光板は、以前、筆者が光磁気ディスク（例えば MiniDisc）における新しい光磁気信号検出方法を検討した際に提案したものである[10]。ホログラム記録再生用としては、それぞれの旋光角が ± 45 度となるように結晶の厚みを研磨により調整した。これを、片面ARコートを施した2枚のガラスでサンドイッチし、表面反射を抑えている。試作した複合旋光板の概要と外観写真を図129に示す。

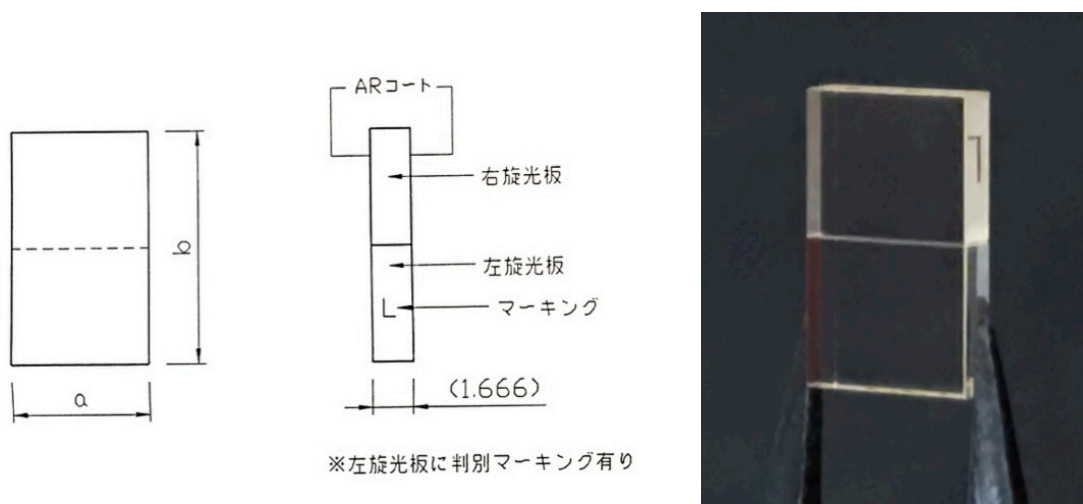


図 129 試作開発した偏光コリニアホログラフィー用の複合旋光板(Gyrator)

偏光コリニアホログラフィーの主要な光学部品の配置と光路の関係を、図130に模式的に示す。なお、レーザー光源や、ビームスプリッター等の他の光学部品は省略してある。複合旋光板は、対物

レンズの入射端面の近くに配置される。複合旋光板と対物レンズによる集光機能をホログラフィーに応用した場合、ファラデー効果のような非相反偏光回転の機能が擬似的に実現され、参照光と情報光が同軸で角度を持たないコリニアなホログラム記録再生光学配置が実現される。なお、物体光（Objective Beam）を記録媒体の手前に焦点を結ぶように設計すると透過型ホログラムが形成され、参照光と同一の焦点に設計すると反射型ホログラムが形成されるという特徴を持っている。本光学系では、透過型ホログラムを形成する光学配置を用いて、偏光の変換とホログラム記録再生方法について説明する。

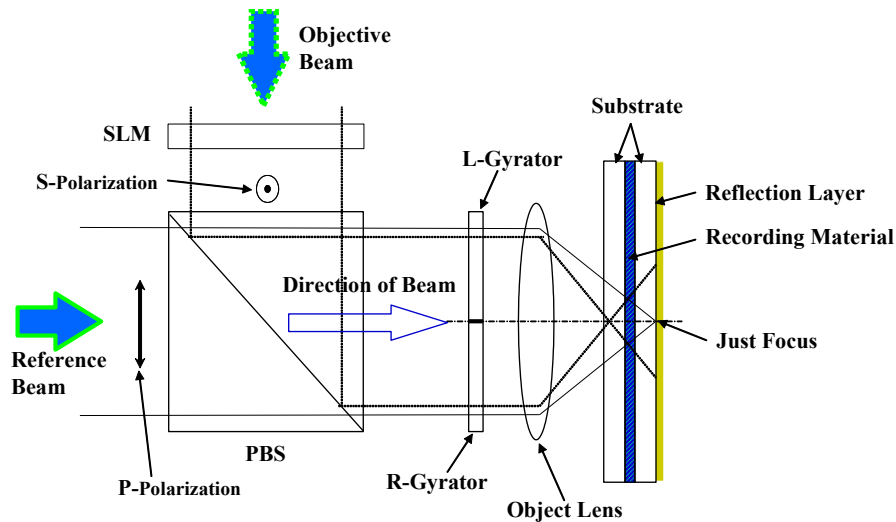


図 130 複合旋光板を用いた偏光コリニアホログラフィーの光学系主要部と光線の関係

まず、図 1 3 1 を用いて、後の説明で使用するA偏光およびB偏光と、P偏光およびS偏光との関係を次のように定義する。A偏光はS偏光を $+45^\circ$ またはP偏光を -45° 偏光方向を回転させた直線偏光とし、B偏光はS偏光を -45° またはP偏光を $+45^\circ$ 偏光方向を回転させた直線偏光とする。A偏光とB偏光は、互いに偏光方向が直交している。なお、S偏光は偏光方向が入射面（図 3. 2 の紙面）に垂直な直線偏光であり、P偏光は偏光方向が入射面に平行な直線偏光である。

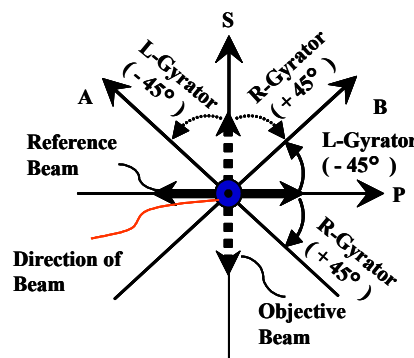


図 131 偏光コリニアホログラフィー光学系における偏光の変換 説明図

次に、図 1 3 0 に戻って、複合旋光板と対物レンズの組合せによる偏光の変換の様子を説明する。まず図において、参照光（Reference Beam）は P 偏光であるので P B S を 1 0 0 % 透過し、右旋光板（以下、R と略記する）と左旋光板（以下、L と略記する）に入射される。R と L とで透過した後の偏光面は互いに異なった偏光に変換される。片方ずつ説明すると、図 1 3 1 で示したように P 偏光は R を透過後に $+45^\circ$ 偏光面が回転し A 偏光になる。また、この光は対物レンズによってディスクの反射面に集光されたあと反射し、再び対物レンズで平行光となって今度は L に反対の面から入射される。そのため A 偏光は S 偏光に変換される。その結果、P B S によって 1 0 0 % 反射され、戻り光は入射光とは別の光路に変更される。もう片方の参照光は、同じ P 偏光の参照光でありながらまず L を透過することで B 偏光へ変換される。しかし、ディスクの反射面で反射し R を逆向きに透過すると S 偏光に変換され、やはり P B S で 1 0 0 % 反射され光路が変更される。物体光の偏光も同様のルールで変換される。以上の偏光の変換の仕方でわかるように、旋光板の旋光性（偏光の回転）そのものは相対的なものであるが、光軸を中心に右旋光板と左旋光板を貼り合わせた複合旋光板と対物レンズ及び反射面を用いることで、擬似的にファラデー素子のような非相反偏光コントロールを行うことを可能にしている。

以上の偏光状態に従って、図 1 3 2 を用いて偏光コリニアホログラフにおけるホログラムの記録原理を説明する。すでに図 1 3 1 で示したように、参照光どうし、物体光どうしは、偏光面が直交しているため干渉縞を形成しない。しかし、物体光と参照光のそれぞれ A 偏光どうし、B 偏光どうしは干渉縞を形成する。光の進行方向と記録媒体の位置関係から、ともに透過型ホログラムが形成される。また、それぞれ半月状のホログラムが 2 つ向きあって満月のように組み合わせられた形のホログラムとなる。

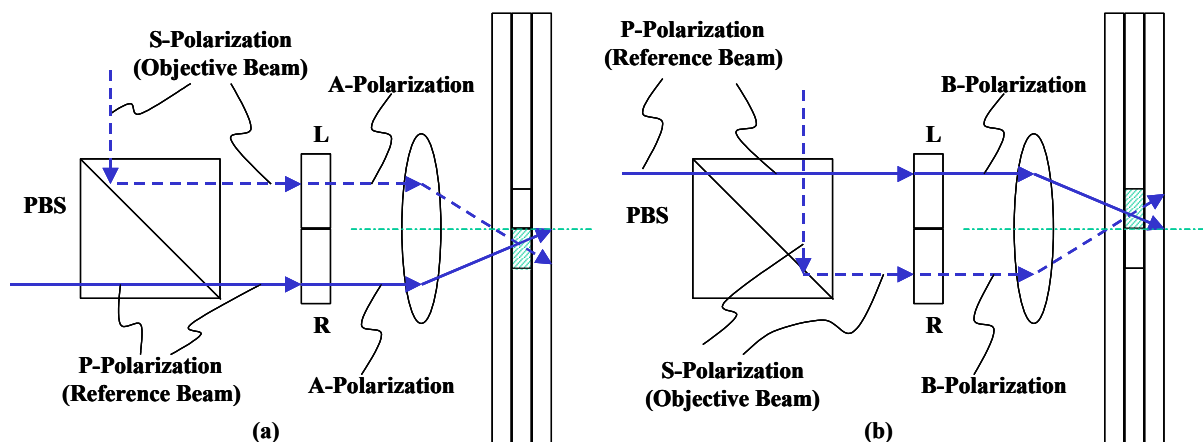


図 132 偏光コリニアホログラフにおけるホログラムの記録原理 説明模式図

最後に図 1 3 3 を用いて、上述のようにして記録されたホログラムからの情報の再生と、偏光による再生用参照光の分離方法を説明する。まず、図 (a) で、形成された半月状のホログラムからの像再生の仕方を説明する。像の再生は記録と反射方向に進む参照光、すなわち、ディスクの反射面で、一旦反射した光によって行われる。このとき形成されているホログラムは透過型ホログラムであるため、再生された物体光は、入射してきた方向に向かって逆向きに進光していく。左(L)を透過した参照光による再生光は、回折によって方向を変えられ、再び同じ左(L)を透過するため、この再生像は再びP偏光となるため、PBSを透過していく。一方、ホログラム再生用の参照光(0次光)はというと右(R)を透過するためS偏光に変換されPBSで反射される。(b)も同様である。以上のようにして、参照光と再生された物体光は偏光面が互いに直交しており、光磁気ホログラフィーにおける直交分離再生原理と同等の効果を期待することができる。

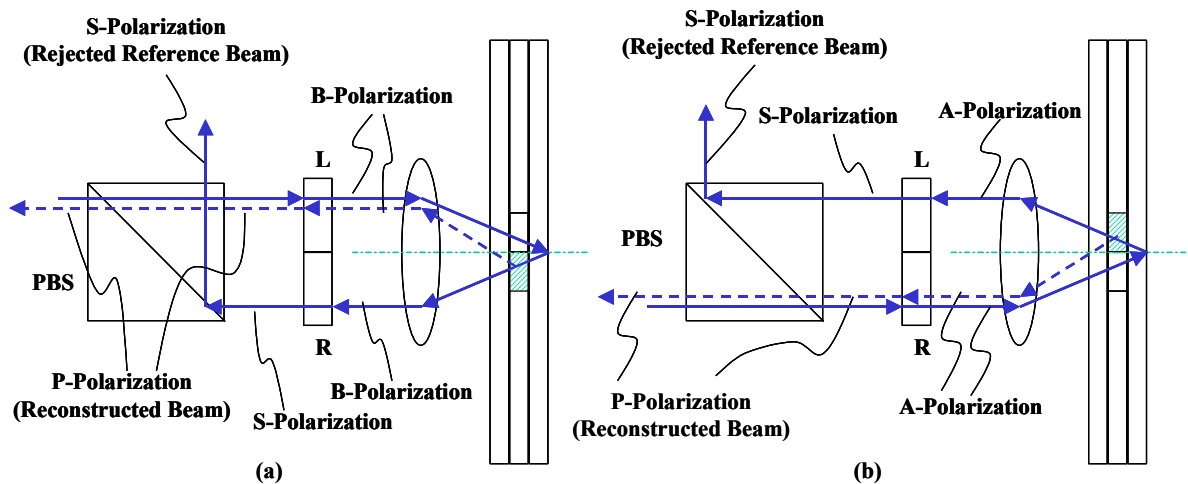


図 133 ホログラムからの情報の再生と偏光による参照光の分離方法 説明模式図

A. 4 偏光コリニアホログラフィーの基礎原理実証実験結果

図 1 3 4 に偏光コリニアホログラフィーの実験光学系主要部の模式図と、偏光分離再生実験結果を示す。図示しないが、ホログラムの記録再生に用いたレーザー光源は波長 532nm の Spectra-Physics 社の MILLENNIA VS、記録情報としての 2 次元画像を表示する空間光変調素子は CRL 社の MINATURE LCD (小型液晶表示デバイス) を用いた。カスタム設計開発した複合旋光板は、縦×横×厚み=10×6×3.5mm で、2 分割された旋光板の旋光角はそれぞれ+45 度と-45 度 (いずれも波長 532nm での値) となっている。記録メディアは、ホログラム記録用に試作開発されたフォトポリマーを用いた。

基礎原理実証を目的としているため、記録メディアは反射膜を持たない透過型とし、記録メディア

を挟んだ反対側（図の右側）にも入射側と同じ光学系を設置した。

ホログラム再生時に、記録メディアの右側に PBS を挿入しない場合、再生用参照光が同軸で混ざり合うため再生像の認識は難しいが、PBS を挿入した場合には同軸の光学配置であるにも関わらず、参照光が偏光分離され、SNR の高い再生像を得る事に成功した。これにより、偏光コリニアホログラフィーの基本的な動作が原理的に実証された。

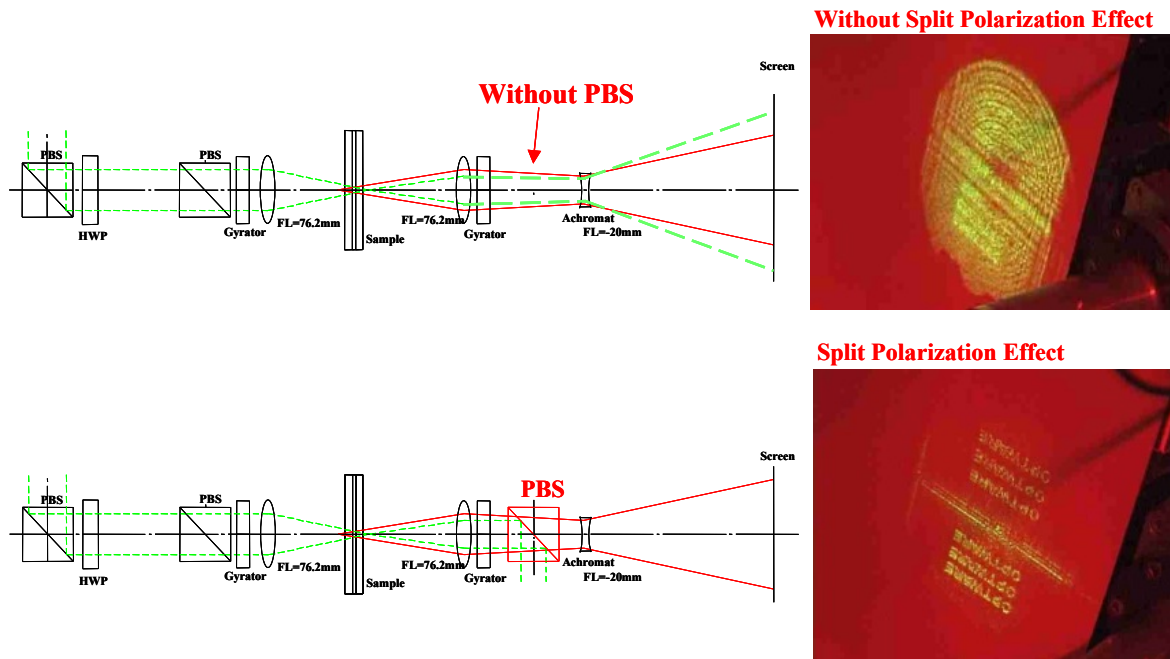


図 134 偏光コリニアホログラフィーの実験光学系主要部と偏光分離再生の原理実証結果

A.5 考察 および 得られた知見

複合旋光板を用いた偏光コリニアホログラフィーでは、これまで実現不可能とされた同軸配置でのホログラムの形成と参照光と物体光の偏光による分離の両立が可能であることが、実験を通して実証された。この方式はどのような記録媒体にも応用可能である。

しかしながら、旋光板を貼り合わせた界面では、少なからず光学的な散乱ノイズが認められた。また、複合旋光板における貼り合わせ境界面が光軸中心からずれた場合にも、偏光分離の取れ残りが生じてしまい、ノイズ光が発生してしまうという現象も観測された。このように、光学的に最も高品質が期待される光軸の中心部分であるにもかかわらず、ノイズ光により SNR が低下してしまうという現象は、ページフォーマットの設計の観点からも好ましくない。

以上の結果より、ホログラフィックメモリーの実用化に際しては、これらの問題点を抜本的に改良する、新たなアプローチが必要である事が明らかとなった。

しかし一方では、同軸の光学系配置でありながら、記録媒体中へ干渉縞の形成が実現でき、かつ、参照光を分離した再生が可能であるという、極めて有用な知見を得ることができた。また、物体光と参照光の偏光を制御する事によって、記録媒体中に透過型ホログラムや反射型ホログラムを選択的に記録することが可能であるという、大きな確信を得た。これらの成果は、現在のコリニアホログラフィーへと発展させるための大きな試金石となった。更にまた、ホログラフィック 3D プリンターを実用化開発する際に、同一方向から対物レンズに入射する光でありながら、リップマン型の反射回折格子を形成する際の重要なノウハウとなった。

参考文献

- [1] Demetri Psaltis, Fai Mok, “Holographic Memories,” Scientific American, 70-76, November 1995.
- [2] 辻内順平：ホログラフィー（裳華房社, 1997）
- [3] 久保田敏弘：ホログラフィ入門－原理と実際－（朝倉書店社, 1995）
- [4] 堀米秀嘉、“デジタルボリュームホログラフィーで何が可能か？”，エレクトロニクス, 100-103, 1996 年 5 月号.
- [5] G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink, “Principles of Optical Disc Systems,” Adam Hilger Ltd., (Bristol and Boston, 1985).
- [6] D. Gabor, “A new microscope principle,” Nature, **161**, 777 (1948).
- [7] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed Wavefronts and Communication Theory,” J. Opt. Soc. Am., **52**, 1123 (1962).
- [8] 堀米秀嘉、井上明、見山友裕、藤井壽崇、鈴木新一、草鹿履一郎、徳島忠夫、“非晶質 TbFe 薄膜を用いた磁気ホログラフィによる高密度記録”，日本応用磁気学会誌, Vol.8 No.2, 109-112, 1984.
- [9] 鶴田匡夫：続 光の鉛筆－光技術者のための応用光学－（新技術コミュニケーションズ社, 1988）.
- [10] H. Horimai, K. Seo, K. Toyota, and K. Saito, “Brand-new method for magneto-optical signal detection with ultra-resolution,” Intern. Soc. Opt. Engn., vol.2514, 118-128, 1995.

付録 B

Pixel Spread Function : PxSF

B.1 はじめに

コリニア方式によるホログラムの記録再生メカニズムを、単純化された数値モデルで記述することは、特性解析や問題点の改善、更なる高密度記録の実現の為に、極めて重要である。コリニア方式では、一つの情報ピクセルと一つの参照ピクセルに着目した場合、対物レンズ通過後は二光束干渉法および角度多重と同じ様な記録再生プロセスになると考えた。そうすると、最も単純な記録プロセスは、この2つのピクセルで規定される2つの平面波による単純なグレーティングでの記述となる。一方、再生プロセスは、このグレーティングに対して、全ての参照ピクセルから異なる角度で照射された再生像の総和での記述となる。本章では、まず上記の観点から構築された数値モデルについて簡単に解説する。次に、情報光の1点(1ピクセル)が、全ての参照光ピクセルにより記録再生された光電場の関数を Pixel Spread Function (PxSF) として定義し、この関数を用いることで、コリニア方式の記録再生におけるページデータの品質を数値シミュレーションにより定量的に解析できる事を示す。

B.2 コリニア方式の数値モデル化

コリニア方式の光学モデルを図 1 3 5 に示す。コリニア方式では、空間光変調器 (SLM) から発する光は、ピクセル毎に離散的な光線として取り扱える。また、SLM のイメージが、リレーレンズによって、対物レンズの入射瞳面に結像されている状態を想定する。ピクセルは微小な開口を持ち独立に ON/OFF できる点光源と仮定し、そこから発する球面波が対物レンズに到達したあと、平面波 (強度は2次元の sinc 関数) となって、焦点に向かって所望の角度ベクトルを持って進行する。そこで、情

報ピクセルと、参照ピクセルを、それぞれ一つずつ選び、記録されるグレーティングを規定する。そうすると、SLM のピクセルの位置に対応した 2 つの入射光の組み合わせで、平面波同士の単一周期のグレーティングが記録メディア上に形成されるように記述できる。

単純化するため、情報パターンのピクセル同士や参照パターンのピクセル同士のグレーティングは計算には入れない。また、この光学モデルでは、記録媒体の反射膜で反射する代わりに鏡面对称に同じ光学系があるものと仮定し、透過型で伝搬するものとして扱う。従って、同図 (b) (c) に示すように、記録層の厚さ t は、実際の記録層の厚さの 2 倍に設定される。記録層の平均屈折率は n 、記録層の外の屈折率は 1 とする。波長 λ は真空中の波長である。記録材料は理想的であるとして、どのような 2 つのピクセルからでも、それぞれが等しい屈折率変調量 n_1 で記録されるものと仮定する。なお、同一の情報ピクセルは、他の参照ピクセルともグレーティングが形成されるが、その場合には、また別の単一周期のグレーティングが形成されるものとし、それらが記録メディアのダイナミックレンジの制約無く、理想的に（線形的に）多重記録されるものと仮定する。

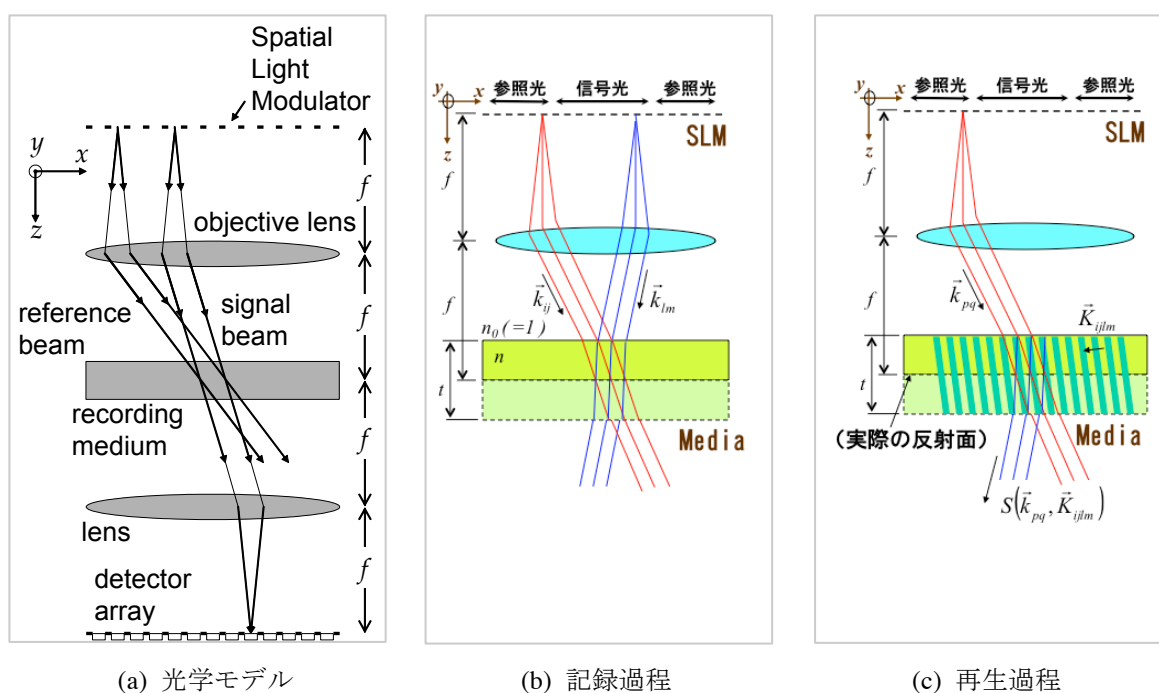


図 135 コリニア方式の光学モデル

図 1 3 6 に示すように、記録材料に入射する平面波の \mathbf{k} ベクトルは、それに対応する SLM のピクセルの位置によって、一義的に決定される。SLM の (i, j) 番目のピクセルから発して記録メディア内部に入射される平面波の \mathbf{k} ベクトルは、次のように表される。

$$\mathbf{k}_{ij} = \frac{k_0}{f} \left(-x_i, -y_j, n\sqrt{f^2 - x_i^2 - y_j^2} \right) \quad (13)$$

ここで、 k_0 は真空中の光の波数、 n は記録メディアの屈折率、そして (x_i, y_j) は SLM の (i, j) 番目のピクセルの位置である。なお、レンズは正弦条件を満たしているものと仮定する。

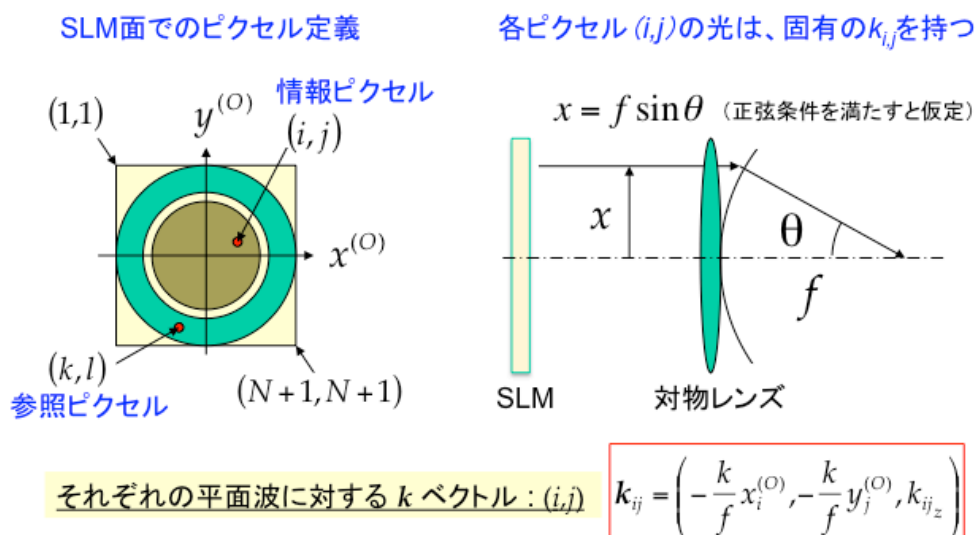


図 136 SLM 面でのピクセル座標と、記録メディア内部の k ベクトルの関係

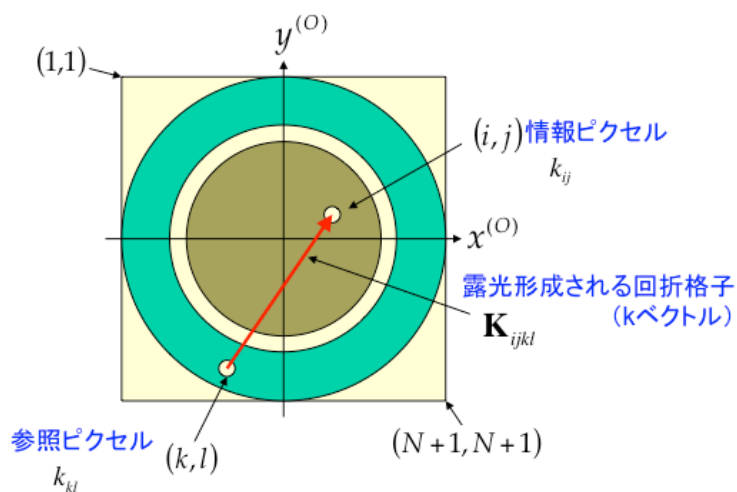


図 137 参照ピクセルと情報ピクセルにより露光形成される回折格子

次に、記録再生について記述する。まず、記録される干渉縞について、図 1 3 7 を用いて説明する。情報ピクセルを (i, j) 番目とし、参照ピクセルを (k, l) 番目とした場合、露光形成される回折格子 \mathbf{K}_{ijkl} は次のように記述される。

$$\mathbf{K}_{ijkl} = \mathbf{k}_{ij} - \mathbf{k}_{kl} \quad (14)$$

続いて、再生について図 1 3 8 を用いて説明する。厚みのあるホログラムでは、光は、屈折率分布周

期の繰り返しの中を伝搬するなかで位相整合して成長していく。これが、いわゆる Bragg 条件を満たした状態である。本数値モデルでは、形成されたホログラム（干渉縞）は、光学系光軸に垂直な X 方向や Y 方向には無限に存在していると仮定するため、X 方向や Y 方向に対して Bragg 条件からずれる光は発生してこないものとする。そのため、記録時とは異なる位置の参照ピクセル (m, n) 番目からの光が再生時に回折格子 K_{ijkl} に照射された場合でも、 $(m+i-k, n+j-l)$ 番目の SLM ピクセルに相当した位置（実際は CMOS などの検出器上）へ再生光が現れることが予想される。このような現象は、Bragg Degeneracy [1-2] と呼ばれている。

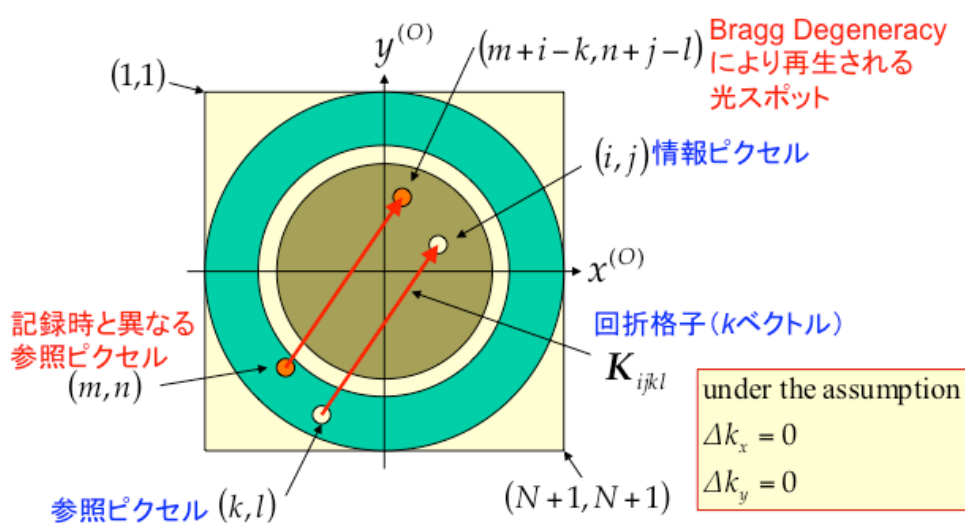


図 138 記録時とは異なる参照ピクセルからの Bragg Degeneracy による再生

このようにして回折される光の複素振幅は Kogelnik の coupled-wave theory [3]を用いて計算される。この時の Bragg 条件からのずれ、いわゆる Bragg Mismatch は、x 成分と y 成分はゼロとなるため、次のように求められる。

$$\Delta k_z = (k_{mnz} \pm K_{ijklz}) - \sqrt{k - k_{(m+i-k), (n+j-l)_x}^2 - k_{(m+i-k), (n+j-l)_y}^2} \quad (15)$$

なお、ホログラフィックメモリーでは、非常に回折効率の低いホログラムを記録するため、この数値モデルにおいては、回折した光が、再度、他の回折格子で回折したとしてもその再生光量は非常に小さいため、その効果は無視できると考えている。そのため、CMOS センサー上で検出される再生像は、記録された干渉縞に対して、全ての参照ピクセルからの回折光を、単純に（もちろん位相は考慮して）総和したもので得られる。

B.3 コリニア方式における再生特性の数値計算結果

上述した数値モデルを用いて、コリニア方式における再生像生成の特徴を、数値計算によって求めた結果を示す。計算は、2次元ディテクター上における光強度分布として求めた。計算に用いたピクセル数は、SLM および2次元ディテクターともに同じで、 201×201 ピクセルである。

前述の通り、式(14)のように2つの平面波(k_{ij} , k_{kl})により Bragg 条件が満たされるように形成された干渉縞であっても、Bragg Degeneracy により、図139に示すように、これとは異なる2つの平面波($k_{i'j'}$, $k_{k'l'}$)でもこの回折格子 K_{ijkl} を共有することが可能であることが分かる。

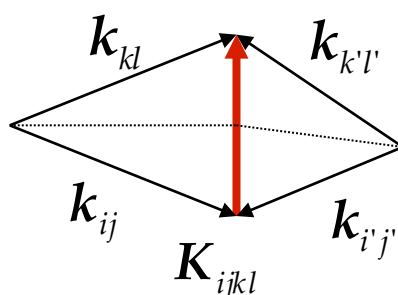


図 139 Bragg Degeneracy による同一干渉縞の共有

そこで、1つの情報ピクセルと1つの参照ピクセルから生成される2つの平面波だけで形成された、たった一つの干渉縞に対して、全ての参照ピクセルにより読み出される再生像を数値計算により求めた。計算に用いた波長は 532nm、記録メディアの屈折率は 1.5 とした。数値シミュレーションの結果を図140に示す。

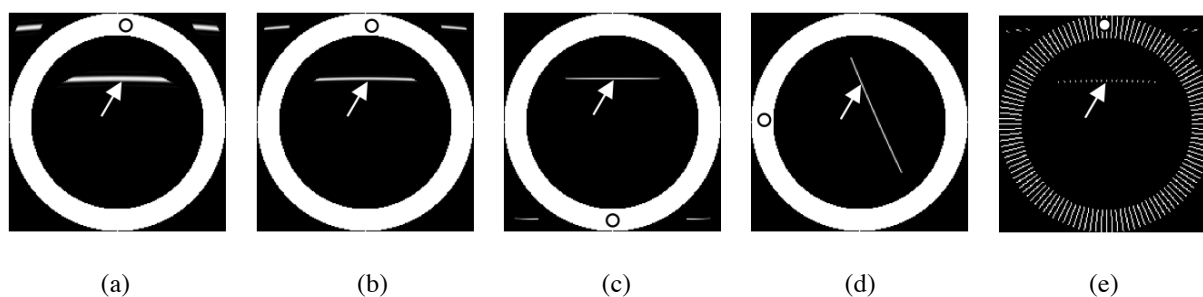


図 140 2次元ディテクター上での再生像（記録材料厚み (a) $100 \mu\text{m}$ 、(b)–(e) $200 \mu\text{m}$ ）

図において、記録した1つの情報ピクセルの位置は矢印で示した位置にあり、記録に用いた参照ピクセルは丸印で示した位置にある。理想的には、矢印で示された位置に、たった一つのピクセルが再生されるのが望ましいが、実際には、Bragg Degeneracy により、ライン状の再生光の分布がディテク

ター上に受光されている。ライン状の再生光には幅が有るが、輪帯の参照光のピクセルが全て埋め尽くされている (a) ~ (d) において、ラインの幅に違いが有る事が分かる。これは、図 1 3 5 のコリニア方式の光学モデルで示したように、情報ピクセルと参照ピクセルが記録媒体中で所定の角度を持った二光束干渉が行なわれているため、単純に Bragg の角度選択性がラインの幅となって現れていると考えて良い。(a) と (b) では、(b) のほうが記録媒体の厚みが大きいので、角度選択性が鋭くなり、その結果ラインの幅が減少している。(c) と (d) は、(a) と (b) に比べて、情報ピクセルと参照ピクセルの間隔が離れているため、グレーティングの k ベクトルの長さ $|\mathbf{K}_{ijkl}|$ が大きくなり、それに従って、ラインの幅も細くなっていくのが分かる。さらに、このラインは、(d) のように情報ピクセルと参照ピクセルを横にずらして露光した場合からも見て取れるように、常にグレーティングの k ベクトルの z 成分に垂直な方向へと延びるのが分かる。輪帯参照光を周方向に間隔の空いた放射状のパターンとした場合には、このラインも間隔の空いた破線状となる。なお、同図の (a) ~ (c) には、この他に 2 つの短い線状の光が観測されるが、これは式 (1 5) の \mathbf{K}_{ijklz} のマイナス符号の成分である。

B. 4 Pixel Spread Function (PxSF)

上述では、一番シンプルなモデルとして、1 つの情報ピクセルと 1 つの参照ピクセルにより形成された単純な干渉縞を形成した場合を議論した。一方、実際のコリニア方式においては、1 つの情報ピクセルに注目した場合でも、この情報ピクセルと全ての参照ピクセルとがそれぞれ干渉して形成された干渉縞が多重記録される記録過程と、その形成された全ての干渉縞の一つ一つに対して全ての参照ピクセルと総当たりで再生される再生過程で、実際の記録再生は行なわれていると考えられる。

そこで、情報パターン中のある 1 ピクセルからの光が、参照パターン全体からの光と干渉して記録され、同じ参照パターンで読み出されて再生されたときの状態を数値シミュレーションした。その結果の一例を図 1 4 1 に示す。

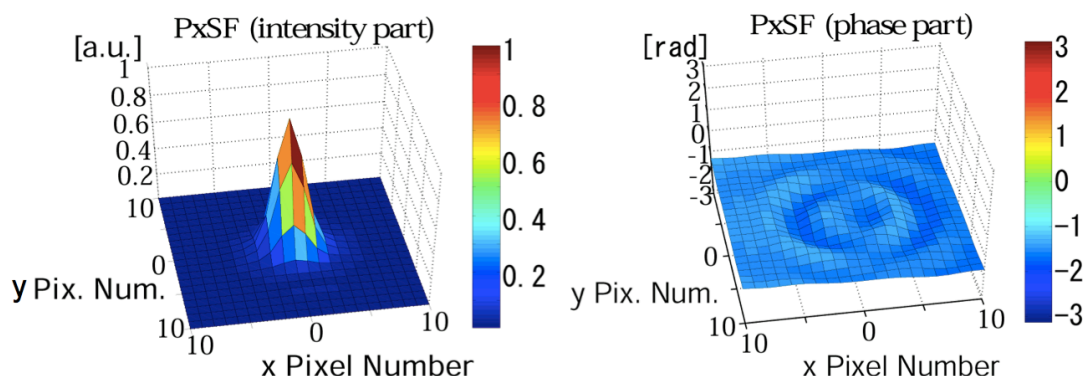


図 141 1 ピクセル情報のコリニア方式による記録再生（数値計算）結果：PxSF の定義

この結果から、コリニア方式を忠実に模擬した記録再生数値計算では、ライン状の再生光は無くなり、1点の再生光のみとなる事が分かった。また、ページデータの情報光のエリアで情報ピクセルの位置を種々に変化させて数値シミュレーションを行なっても、強度分布に若干の違いはあるものの、やはり1点の再生光のみとなる事が分かった。これらは、実際のコリニア方式の記録再生実験結果とも、良く一致している。このように1点の再生像となるのは、同図（右）の位相分布に示されるように、全ての再生像同士が回転対称的に位相干渉を起こして、**Bragg Degeneracy** によって生じている再生像成分が打ち消し合うあって減少し、本来の再生像成分のみが同相として強め合った結果ではないかと推測された。

そこで、情報パターン中のある1ピクセルからの光が、参照パターン全体からの光と干渉して記録され、同じ参照パターンで読み出されて再生されたときの光電場を『Pixel Spread Function』と定義することにした。略称として『PxSF』と命名された。PxSF は、結像光学で一般的な Point Spread Function (PSF、点像分布関数 [4-5]) の point を pixel と置き換え、PSF の定義式を離散的にした形で記述される。

PxSF は、例えば、図 1 4 2 に模式的に示すように、コリニア方式における記録再生特性の品質や特徴を評価する関数として用いることができる。

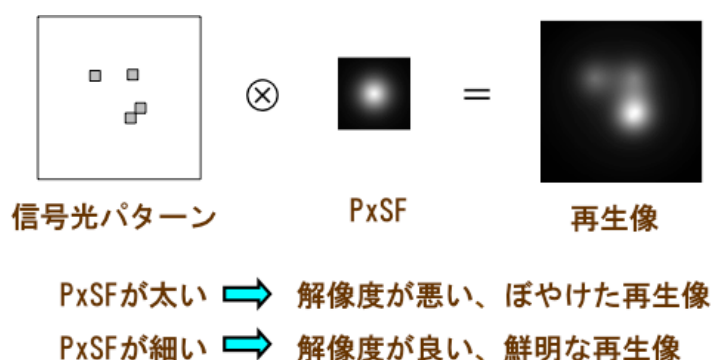


図 142 PxSF によるコリニア方式の記録再生特性の評価 模式説明図

B. 5 PxSF を用いた参照光パターンの評価結果

PxSF を、各種の参照光パターンでシミュレーションした結果を図 1 4 3 に示す。(a) は、輪帯の参照光のピクセルが全て埋め尽くされたパターン、(b) は輪帯の参照光が同心円状に配列されたピクセルによって構成されたパターン、(c) はコリニア方式で最終的に採用された放射状の輪帯参照光のパターンにしたものである。図に示すように、それぞれのパターンで PxSF の形状が異なった。それぞれの特徴を述べると、まず (a) の輪帯パターンは、全体的に裾野（隣接ピクセルがある場合には、ピクセル間のクロストークに影響を及ぼす）の相対強度が大きく、PxSF の広がりや 3 つのパターンの

中でもっとも大きかった。(b) の同心円パターンの場合は、PxSF がドーム状のような広がりを持った形状を示した。形状の起伏は緩やかであった。(c) の放射状パターンの場合は、他の 2 つのパターンとは対称的で、シグナルの近傍はクロストークが発生しておらず、変則的ではあるが PxSF の広がり自体は小さかった。また、シグナルの回りに同心円状に side lobe のようなリングが表れた。

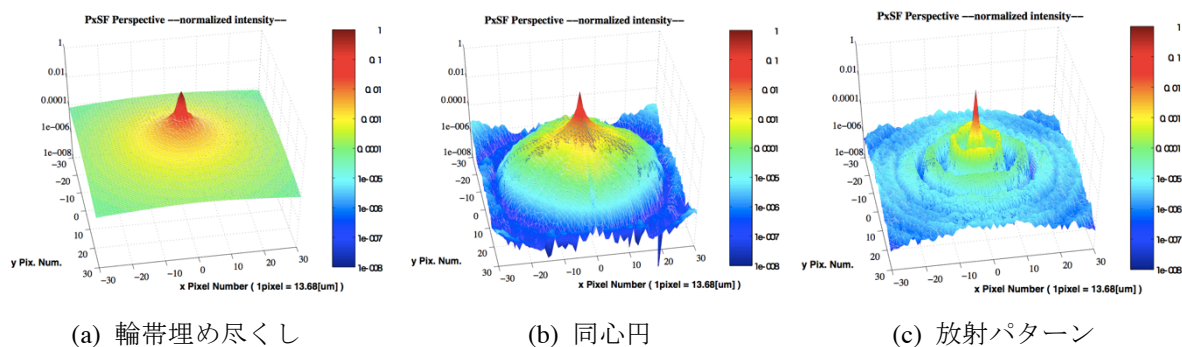


図 143 各種の参照光パターンでの PxSF シミュレーション結果

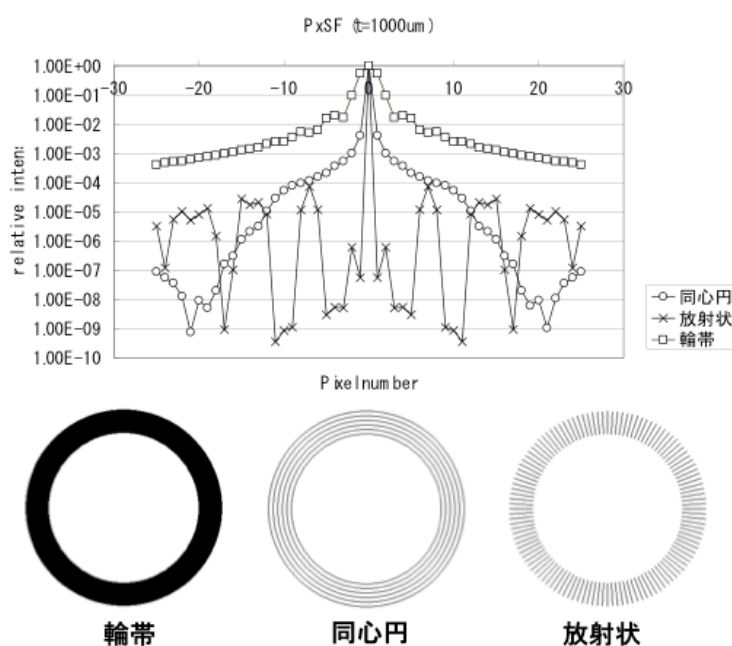


図 144

図 1 4 4 は、図 1 4 3 のグラフを、情報ピクセルの再生光（強度の中心）を通る断面で切ったときの分布を示したものである。このグラフから、記録再生された情報ピクセルの相対強度分布を定量的に評価することができる。PxSF の広がり小さいのは (c) の放射状パターンで、PxSF の最も広がりが大きいのは (a) の輪帯パターンで、その次に (b) の同心円パターンであった。

B.6 まとめ

コリニア方式によるホログラムの記録再生メカニズムを、単純化された数値モデルで記述し、情報光の 1 点(1 ピクセル)が、全ての参照光ピクセルにより記録再生された光電場の関数として Pixel Spread Function (PxSF) を定義し、この関数を用いて、コリニア方式の記録再生におけるページデータの品質を数値シミュレーションにより定量的に解析できる事を示した。

その結果、参照パターンの形状によって PxSF の広がり分布が大きく変化することが明らかとなった。輪帯パターンのときは PxSF の広がりには特に大きく、高品質な記録再生には適さない事が示唆された。また、同心円パターンのときにも、PxSF の隣接するピクセル近傍の広がりが大きく、第 3 章で報告した通り、再生データにノイズが重畳される原因が示唆されていた。しかし、最終的に採用されている、放射状パターンでは PxSF の広がりは最も小さかった。

以上により、PxSF がコリニア方式における高品質な記録再生を実現するための評価関数として、極めて有効である事が示された。

参考文献

- [1] S. S. Orlov, L. Hesselink "Holographic shift multiplexing in thin volumetric media," JOSA B20 1912-1921 (2003).
- [2] C.C.Sun, M.S.Tsaur, W.C.Su, B.Wang, E.T.Chiou. "Two-dimensional shifting tolerance of a volume-holographic correlator". Appl. Opt., Vol. 38, No. 20, pp. 4316–, (1999).
- [3] Kogelnik. "Coupled-wave theory for thick hologram gratings". Bell Sys. Tech. J., Vol. 48, pp. 2909–2947, (1969).
- [4] E.Hecht 著, 尾崎 義治, 朝倉 利光 訳. 光学. 丸善, 第 4 版, (2002).
- [5] 栖原 敏明. "光波工学". 光エレクトロニクス教科書シリーズ. コロナ社, 第 1 版, (1998).

謝辞

本研究は株式会社オプトウエアおよび新オプトウエア株式会社の在職期間およびその後の平成11～24年の間に行なわれたものであり、数多くの方々のご指導およびご協力のもとにまとめることができました。ここに深く感謝の意を表します。

私の恩師である豊橋技術科学大学名誉教授の藤井壽崇先生からは、修士課程の時に、「非晶質 TbFe 薄膜への光磁気ホログラフィーの研究」というテーマを頂き、ホログラフィーの研究を始めるきっかけを作って頂きました。さらに、ここで得られた知見が、後に偏光コリニアホログラフィーという方式を生むきっかけとなり、コリニア方式の基本となりました。私の人生最大の研究テーマを与えて頂いた事に、深く感謝致しております。

また、同じ研究室の先輩であり、現在は豊橋技術科学大学 理事 副学長の井上光輝先生には、ソニー退社後のベンチャー企業立ち上げの時期に共同研究のお声を掛けて頂き、国プロとして、本格的にホログラフィックデータストレージの研究開発をスタートさせて頂く事ができました。さらに、本方式に、『コリニアホログラフィー』という名前を付けて頂きました。井上先生が採択された多くの国プロに参加させて頂く事で、コリニアホログラフィーが学術的にも大きな成果を上げる事ができました。心から感謝致しております。更に、ベンチャー企業「オプトウエア」の共同創立者である木下昌治さん、熊谷健一郎さんとは、HVD : Holographic Versatile Disc の具体的な実用化開発に向けて、共に研究開発体制を構築してまいりました。常に暖かい視線と岐路に立った時の的確なアドバイスを頂き、問題山積だったコリニアホログラフィーを大きく成長させて頂きました。ベンチャー企業の社員第一号の林梅攀さん（現在は豊橋技術科学大学 准教授）には、研究開発の国際的なアライアンスや偏光コリニアホログラフィーの共同研究を積極的に推進して頂きました。オプトウエアの CEO として参画して頂いた青木芳夫さんには、資金調達とマネジメントの両面から研究開発を大きく躍進させて頂きました。オプトウエアにおいて、コリニアホログラフィーの共同研究を行なっていた譚小地さん（現在は北京理工大学 教授）と李駿さんは、コリニア方式の研究開発成果を世界最先端の学術レベルで確立して頂きました。更に、多くの科学者および技術者の方々がこのベンチャー企業に集合し、切磋琢磨するとともに、共同研究企業との会社の枠を遥かに超えた密な連携により、回転するホログラフィック光ディスクへの、ダイナミックなコリニアホログラフィーの記録再生を実現することができました。最終的には、ホログラムメモリーでは世界初となる Ecma International の世界標準規格 : HVD (Holographic Versatile Disc) の認定にまで辿り着きました。研究開発に携わって頂いた方々はもとより、関連部門でサポートして頂いた皆さまのご協力もあっての、この大きな成果だと思っております。ここに改めまして、心から感謝の意を表します。

コリニアホログラフィーは、これまで全く前例のないアプローチでホログラムの記録再生を試みたため、当時、記録再生実験が進展した段階においても、未だに理論的なモデルが確立しておりませんでした。そのような中、東京大学生産技術研究所 教授 志村努先生が親身になってディスカッションをして頂き、その深い洞察力から、コリニア方式の記録再生を PxSF : Pixel Spread Function という関数により記述できる事を理論的に解明して頂きました。これにより、これまでの研究開発の妥当性に確信を持つ事ができ、次の研究開発の指針も得る事ができました。更に、本研究の博士論文の執筆にあたり、多くの有用なアドバイスを頂きました。心より感謝致しております。

ホログラフィックデータストレージの実用化を目指すには、世界最高水準の研究開発を推し進める必要がありましたが、それゆえ、研究開発にブレークスルーを与えられるか、その前に研究開発資金が尽きてしまうかの狭間に立ちながら、ベンチャー企業の運営とエンジニアリングのマネジメント、さらにブレークスルーを得るための自らの研究開発の推進のバランス維持を余儀なくされます。そのような特に厳しい状況の中、新オプトウエアの CEO を請け負って頂きました小野寺恭孝会長には、これらの難しい舵取りをして頂きました。さらに、今すぐ売れる商品をと、コリニア方式を応用したホログラフィック 3D イメージプリンター : CDP-1 の実用化を強力に推し進めて頂いたおかげで、コリニアホログラフィーがホログラムメモリー以外にも応用が可能である事を世界に示す事ができました。小野寺会長には、言葉にできないほど感謝しております。

研究開発の岐路に立ったとき、多くの方々が、常に前進する方向を指し示してくれた事は、私にとって、とても幸運であったと思います。豊橋技術科学大学時代の同級生であり、新しい大学発ベンチャー「3Dragons」の共同創業者でもある、現在は名古屋工業大学 教授 兼 東京大学の特任教授の梅崎太造先生と、株式会社マクシス・シントー 常務取締役の小池一郎さんには、心温まる支援と研究継続のアドバイスを頂きました。また、もう一つのベンチャー企業「Egarim」の共同創業者で代表取締役の加瀬澤寿宏さんには、ホログラフィーの持つ可能性を別の視点から指し示し、コリニアホログラフィーによる超高速・超大面积露光の必要性和有用性を、改めて見出させてくれました。いつも、感謝しております。

研究開発以外でも、多くの方々からコリニアホログラフィーの実現に向けて、ご支援を賜りました。特に、ドトールコーヒー創業者の鳥羽博道さんと現在の代表取締役である鳥羽豊さん、ランチェスター協会会長の田岡佳子さんには、私の夢の実現に多大なるご支援と心からのアドバイスを頂きました。また、技術の要である知的財産戦略では、弁理士の磯田志郎先生に、研究開発の資金調達戦略では、公認会計士の御旅屋尚文先生に、貴重なアドバイスを頂きました。また、国産初の大型プロジェクトである本研究開発を推進するにあたっては、国内外のベンチャーキャピタルおよび企業から、研究開発資金の援助を頂きました。改めましてお礼を申し上げますとともに、心より感謝致しております。

最後に、私のわがままを寛大な心で許容してくれてこれまで支えてくれた妻の由美と、思いやりのある大人に育ってくれた息子の大地と娘の青海に、こころから感謝しています。 ありがとう！

研究業績リスト

原著論文（本研究に関する論文は 1-7）

- [1] Hideyoshi Horimai, Akira Inoue, Tomohiro Miyama, Toshitaka Fujii, Shinichi Suzuki, Riichiro Kusaka and Tadao Tokushima, “High-Density Information Storage by Means of Magnetic Holography on Amorphous TbFe Thin Films,” Journal of the Magnetism Society of Japan, Vol. 8, No. 2, 109-112 (1984).
- [2] Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Advanced Collinear Holography,” Optical Review, Vol. 12, No. 2, 90-92 (2005).
- [3] Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, and Jun Li, “Collinear Holography,” Applied Optics, Vol. 44, No. 13, 2575-2579 (2005).
- [4] Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, Jun Li, and Kenji Suzuki, “Wavelength Margin Analysis in Advanced Collinear Holography,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 5B, 3493-3494 (2005).
- [5] Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Collinear Technology for Holographic Versatile Disk,” Applied Optics, Vol. 45, No. 5, 910-914 (2006).
- [6] Tsutomu Shimura, Shotaro Ichimura, Ryushi Fujimura, and Kazuo Kuroda, Xiaodi Tan and Hideyoshi Horimai, “Analysis of a Collinear Holographic Storage System: Introduction of Pixel Spread Function,” Optics letter, Vol. 31, No. 9, 1208-1210 (2006).
- [7] Xiaodi Tan and Hideyoshi Horimai, “Collinear holographic information storage technologies and system” ACTA OPTICA SINICA, Vol. 26, No. 6, 827-830 (2006).
- [8] YuQiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測システムの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.1, 56-62 (2014).
- [9] YuQiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測装置の開発”, 精密工学会誌, Vol.80, No.4, 375-381 (2014).
- [10] YuQiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショットデジタルホログラフィによる赤血球の三次元計測”, 精密工学会誌, Vol.81, No.3, 247-251 (2015).
- [11] Kazuki Nakamura, Hiroyuki Takagi, Taichi Goto, Pang Boey Lim, H. Horimai, H. Yoshikawa, V. M. Bove and Mitsuteru Inoue, “Improvement of diffraction efficiency of three-dimensional magneto-optic spatial light modulator with magnetophotonic crystal”, Applied Physics Letters, 108, 2, 022404 (2016).

- [12] Xin Luo, Yue Chen, Yong Huang, Xiaodi Tan & Hideyoshi Horimai, “360 degree realistic 3D image display and image processing from real objects,” December 2016, Volume 23, Issue 6, pp 1010–1016. Optical Review
- [13] Toshihiro Kasezawa, Hideyoshi Horimai, Hiroshi Tabuchi & Tsutomu Shimura, “Holographic window for solar power generation,” December 2016, Volume 23, Issue 6, pp 997–1003. Optical Review

レビュー論文・その他の原稿

- [14]Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Collinear Holography / Principle and Applications,” Journal of the Imaging Society of Japan, Vol. 45, No. 3, 270-276 (2006).
- [15]Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Holographic Information Storage System: Today and Future,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 2, 943-947 (2007).
- [16]Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Read-only holographic versatile disc system using laser diode,” in Holography 2005 (International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information), Yury Denisyuk, Ventseslav Sainov, Elena Stoykova eds., Proceedings of SPIE Vol. 6252, 62520Z (2006).
- [17]堀米秀嘉, “光フェーズロック方式多値コリニアホログラフィ,” (独)日本学術振興会 産学協力研究委員会「フォトニクス情報システム第 179 委員会」第 6 回研究会 (2007).
- [18]Hideyoshi Horimai, “Holographic 3D-image Printer System with Collinear Optics,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, IWH 2015 Digest, Tu2-4 (Okinawa, 2015).
- [19]堀米秀嘉, 井上明, 見山友裕, 藤井壽崇, 鈴木新一, 草鹿履一郎, 徳島忠夫, 松本誠二, “TbFe 非晶質薄膜を用いた高密度磁気ホログラム記録,” 電子通信学会研究会, CPM83-85, 55-60 (1984).
- [20]青木芳夫, 川久保伸, 堀米秀嘉, 井橋孝夫, “光磁気ディスクシステム開発の現状と将来展望,” 応用磁気学会研究会, MSJ 42-3, 19-27 (1985).
- [21]堀米秀嘉, “光技術動向海外調査団の報告,” 財産法人光産業技術振興協会, OPTONEWS, No. 1, 12-14 (1996).
- [22]堀米 秀嘉, “同軸読書き型ディスクホログラフィックメモリー,” O plus E, 25(4), 391-395, (2003).
- [23]堀米 秀嘉, 譚 小地, 北崎 信幸, 金子 和, 李 駿, “離陸間近のホログラフィック媒体 2006 年に 200G バイトを実現,” 日経エレクトロニクス, Guest Paper, 2005 年 1 月 17 日号, 105-114, (2005).
- [24]譚 小地, 堀米 秀嘉, “ホログラフィックメモリー／HVD を支える計測・ナノ制御技術,” 光によ

る極限長さ測定：ナノからサブナノへの光センシング技術，応用物理学会・光波センシング技術研究会，75-82，（東京理科大学，2005）。

- [25]堀米秀嘉，譚 小地，金子 和，“次世代大容量光ディスクシステムに求められる青色半導体レーザー，” Electronic Journal 第 110 回 Technical Symposium，（東京，2005）。
- [26]堀米秀嘉，“コリニア方式ホログラフイーの原理と応用展開，” 三次元映像のフォーラム 第 7 0 回研究会，3D 映像，Vol. 18, No. 4, 45-49 (Dec. 2004)。
- [27]堀米秀嘉，譚 小地，“3.3.5 ホログラフィック ROM 複製技術，” 光技術動向調査報告書，2005FY-003-1，第三章 光メモリー・情報処理，175-177（財団法人光産業技術振興協会，2006）。
- [28]堀米秀嘉，“コリニア方式ホログラフィック光ディスクメモリー：HVD™，” ホログラフィックメモリーのシステムと材料，第 2 章，32-47，（CMC 出版，2006）
- [29]堀米秀嘉，“「ホログラム記録の現状と実用化への道」 2-2 コリニア方式，2-2-1 コリニア記録再生技術，” 映像情報メディア学会誌 2 0 0 7 年 6 月号。
- [30]堀米秀嘉，池田順一，“コリニア方式ホログラフィック光記録材料，” 高分子，56 巻，11 月号，910-913（2007）
- [31]堀米秀嘉，“コリニア方式ホログラムメモリーの最新動向と APIM における取り組み，” HODIC Circular，Vol. 28, No. 3, (Oct. 2008)。
- [32]堀米秀嘉，青木洋二，林 攀梅，井上光輝，“3D ディスプレイがひらく新たな世界、高空間解像度 3D ディスプレイシステムの開発，” 月刊ディスプレイ，65-68（2009 年 12 月号）。
- [33]Hideyoshi Horimai, Daichi Horimai, Tatsuma Kouketsu, Pang Boey Lim and Mitsuteru Inoue, “Full-Color 3D Display System with 360 Degree Horizontal Viewing Angle,” The Journal of Three Dimensional Images, Vo. 24, No. 2, 7-10 (June, 2010)。

学会発表（国際会議）

1. H. Horimai, K. Seo, K. Toyota and K. Saito, “Brand-new method for magneto-optical signal detection with ultra-resolution,” Proc. SPIE, **2514**, 118-128 (1995)
2. Kimihiro Saito and Hideyoshi Horimai, “Holographic 3-D disk using In-line Face-to-Face Recording,” in Technical Digest Series Vol. 8 of Optical Data Storage Topical Meeting 1998, OSA, 52-54 (Aspen, Colorado, U.S.A., 1998)。
3. Hideyoshi Horimai, Pang Boey Lim, Lambertos Hesselink, and Mitsuteru Inoue, “Volumetric Optical Disk Storage with Collinear Polarized Holography,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’02, TuP26,

43-44 (Hawaii, U.S.A., 2002).

4. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, “Novel Optical Disc Storage with Polarized Collinear Holography,” in Technical Digest of Optical Data Storage 2003, 106-108 (Vancouver, BC Canada, 2003).
5. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, “Collinear Holography,” in Technical Digest of The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro Optics CLEO/PR 2003, Proceedings Volume I, 376-377 (Taipei, Taiwan, 2003).
6. Hideyoshi Horimai and Jun Li, “A Novel Collinear Optical Setup for Holographic Data Storage System,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2004, 258-260 (Monterey, California, U.S.A., 2004).
7. Hideyoshi Horimai and Jun Li, “A Novel Collinear Optical Setup for Holographic Data Storage System,” in Optical Data Storage 2004, B. V. K. Vijaya Kumar and Hiromichi Kobori, eds., Proceedings of SPIE 5380, 297-303 (2004).
8. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, “Advanced Collinear Holography,” in Technical Digest of 2004 ICO International Conference of Optics & Photonics in Technology Frontier, 251-252 (Makuhari messe, Chiba, Japan, 2004).
9. Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, Jun Li, and Kenji Suzuki, “Wavelength Margin Analysis in an Advanced Collinear Holography,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory 2004, 42-43 (Jeju Island, Korea, 2004).
10. *(Invited)* Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai, “Mass Duplicated and Secured Technology for Read-Only Holographic Versatile Disc,” in Proceeding of the 17th Symposium on Phase Change Optical Information Storage (PCOS 2005), 64-69 (Welcity Yugawara, Atami-City, Shizuoka, Japan, 2005).
11. Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Duplication Technology for Secured Read-Only Holographic Versatile Disc,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’05, MB7 (Honolulu, Hawaii, USA, 2005).
12. Hideyoshi Horimai and Yoshio Aoki, “Holographic Versatile Disc (HVD),” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’05, ThE6 (Honolulu, Hawaii, USA, 2005).
13. Yawara Kaneko, Nobuyuki Kitazaki, Jun Li, Xiaodi Tan, Hiroyuki Narumi, Masaharu Kinoshita, Kenji Suzuki, Hideyoshi Horimai, Shin Satoh, and Hiroshi Sasaki, “High Density Recording of Collinear Holographic Data Storage,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’05, MP22 (Honolulu,

Hawaii, USA, 2005).

14. Hirotaka Matsumoto and Hideyoshi Horimai, “Direct Observation of Collinear Holographic Image,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’05, MP12 (Honolulu, Hawaii, USA, 2005).
15. Tsutomu Shimura, Shotaro Ichimura, Ryushi Fujimura, and Kazuo Kuroda, Xiaodi Tan and Hideyoshi Horimai, “Calculation of the Pixel Spread Function with a Simple Numerical Model for the Collinear Holographic Storage System,” in Technical Digest of International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage – ISOM/ODS’05, PD (Honolulu, Hawaii, USA, 2005).
16. Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Read-only holographic versatile disc system using laser diode,” in Technical Digest of Holography 2005, International Conference on Holography, Optical Recording and Processing of Information, 89 (Varna, Bulgaria, 2005).
17. (*Invited*) Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Holographic Versatile Disc System,” in SPIE Symposium on Optics & Photonics 2005, Organic Holographic Materials and Applications III (San Diego, California, USA, 2005), Klaus Meerholz eds., Proceedings of SPIE Vol. 5939, 1-9 (2005).
18. (*Invited*) Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Holographic Versatile Disc System,” in Technical Digest of SPIE Symposium on Optics & Photonics 2005, Organic Holographic Materials and Applications III, 5939-01, 571 (San Diego, California, USA, 2005).
19. (*Invited*) Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Holographic data storage/today and future,” in Advance Programme of European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference - CLEO®/Europe-EQEC 2005, CC1-1-TUE, 58 (Munich, Germany, 2005).
20. Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Holographic versatile disc system and tolerance,” in Technical Digest of 20th Congress of the International Commission for Optics, 0408-207, 190 (Changchu, China, 2005).
21. (*Invited*) Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai and Yoshio Aoki, “Holographic versatile disc (HVD),” in Technical Digest of Holo-pack • Holo-print, (Shenzhen, China, 2005).
22. (*Invited*) Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai, “Holographic versatile disc system and secured HVD-ROM,” in Technical Digest of TBOC workshop 2005, (Hangzhou, China, 2005).
23. Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Read-only holographic versatile disc system using laser diode,” in Holography 2005 (International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information), Yury Denisyuk, Ventseslav Sainov, Elena Stoykova eds.,

Proceedings of SPIE Vol. 6252, 62520Z (2006).

24. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan and Yoshio Aoki, “High Density Recording Storage System by Collinear™ Holography,” in SPIE Symposium on Photonics Europe 2006, Photon Management II (Strasbourg, France, 2006), John T. Sheridan, Frank Wyrowski eds., Proceedings of SPIE Vol. 6187, 1-7 (2006).
25. *(Invited)* Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai, Tsutomu Shimura, Ryushi Fujimura and Kazuo Kuroda, “Collinear Holography for Holographic Versatile Disc (HVD) System,” in SPIE Symposium on Photonics North 2006, New optical materials/optical memories, (Québec City Canada, 2006), eds., Proceedings of SPIE NP426, Accepted (2006).
26. *(Invited)* Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai “Collinear Technology for Holographic Versatile Disc (HVD),” in Technical Digest of 10th CISD International Consortium Meeting, (Jeju Island, Korea, 2006).
27. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan and Yoshio Aoki, “High Density Recording Storage System by Collinear™ Holography,” in Technical Digest of SPIE Symposium on Photonics Europe 2006, Photon Management II, 6187-1, 36 (Strasbourg, France, 2006).
28. *(Invited)* Xiaodi Tan, Yoshio Aoki and Hideyoshi Horimai, “Holographic Versatile Disc (HVD™) System,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2006, 6-8 (Montreal, Canada, 2006).
29. K. Mizunoe, T. Sasada, M. Matsumoto, H. Matsuda, N. Kitazaki, M. Igarashi, Y. Sakai, J. Li, S. Yoshino, M. Kakinuma, H. Narumi, A. Kawamura, X. Tan and H. Horimai, “Novel Optical System in HVD™ Drive,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2006, 46-48 (Montreal, Canada, 2006).
30. N. Kitazaki, M. Igarashi, H. Matsuda, M. Kinoshita, Y. Kaneko, Y. Sakai, J. Li, T. Sasada, M. Matsumoto, S. Yoshino, M. Kakinuma, H. Narumi, A. Kawamura, K. Suzuki, Y. Tsurukawa, K. Mizunoe, X. Tan and H. Horimai, “Demonstration of On-the-fly Recording on HVD™,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2006, 49-51 (Montreal, Canada, 2006).
31. M. Matsumoto, H. Matsuda, T. Sasada, Y. Sakai, Y. Kaneko, M. Kinoshita, K. Suzuki, Y. Tsurukawa, X. Tan and H. Horimai, “HVD™ Servo Actuator,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2006, 52-54 (Montreal, Canada, 2006).
32. Tsutomu Shimura, Shotaro Ichimura, Ryushi Fujimura, and Kazuo Kuroda, Xiaodi Tan and Hideyoshi Horimai, “Shift Selectivity of the Collinear Holographic Storage System,” in Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting 2006, 153-155 (Montreal, Canada,

2006).

33. *(Invited)* Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, "Collinear Holography for HVD System," in Technical Digest of SPIE Symposium on Photonics North 2006, New optical materials/optical memories, OM-05-3 , 144 (Québec City Canada, 2006).
34. Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, Nobuyuki. Kitazaki, Takeharu Sasada, Yawara Kaneko, Masaharu Kinoshita, Hiroyuki Matsuda, Katsumi Mizunoe, Masaki Igarashi, Jun Li, Hiroyuki Narumi, Mineyuki Matsumoto, Satoshi Yoshino, Minoru Kakinuma, Yuko Sakai, Kenji Suzuki, Yoshitaka Tsurukawa and Akira Kawamura "Novel Features of HVD™ System," in Technical Digest of SPIE Symposium on Optics & Photonics 2006, Organic Holographic Materials and Applications IV, 6335-17, 124 (San Diego, California, USA, 2006).
35. Xiaodi Tan, Hideyoshi Horimai, Pang Boey Lim and Mitsuteru Inoue "Phase-Locked Collinear™ Holography," in Technical Digest of SPIE Symposium on Optics & Photonics 2006, Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications XII, 6314-63, 78 (San Diego, California, USA, 2006).
36. *(Invited)* Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, "Holographic Information Storage System: Today and Future," in Technical Digest of Asia-Pacific Data Storage Conference (APDSC·06), Accepted (Hsinchu, Taiwan, 2006).
37. Yoji Aoki, Hideyoshi Horimai, Pang Boey Lim, Kenjiro Watanabe and Mitsuteru Inoue, "Directional Light Scanning 3-D Display," SPIE Proceedings, vol. 7635, 76350M (2009).
38. Hideyoshi Horimai, Yoji Aoki, P. B. Lim and M. Inoue, "Development of Direct Light Scanning 3-D Display Proto-type System," International Workshop on Holographic Memories & Display 2009, 4D-5, (Tokyo, Japan, 2010)
39. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, "The Way of the OPTWARE," Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH), Conference Program, DWC2, (Miami, Florida, USA, 2010).
40. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, "Optical Phase-lock Collinear Holography with Multi-level Phase-modulated Data Page," International Workshop on Holographic Memories & Display 2010, 16D-2, (Tokyo, Japan, 2010).
41. *(Invited)* Hideyoshi Horimai, "HOLO-TABLE, A NEW STYLE OF THREE DIMENSIONAL DISPLAY," Moscow International Symposium on Magnetism 2011, 23RP-F-12, (Moscow, Russia, 2011).
42. Qiyue Yu, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, "Development of 3D measurement system using Digital Holography", 23rd 2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp.491- 494 (2012).

43. Qiyue Yu, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “Development of 3D measurement system using phase-shift digital holography”, The International Conference On Future Trends In Computing and Communication, pp.138- 142 (2013).
44. Qiyue Yu, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “Development of 3D Measurement System Using Single-shot Phase-shift Digital Holography”, The 15th International Conference on Precision Engineering, pp.235- 238 (2014).
45. (Invited) Hideyoshi Horimai, Koosuke Hattori, Taizo Umezaki “The Realistic 3D Image Display Using Direct Light Scanning Method”, Proceedings of The 21st International Display Workshops (IDW '14), Vol. 21, DES3/VHF5-2, pp. 1329-1332(2014).
46. Toshihiro Kasezawa, Hideyoshi Horimai, Hiroshi Tabuchi and Tsutomu Shimura, “Holographic Window for Solar Power Generation,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, IWH 2015 Digest, Th2-2 (Okinawa, 2015).
47. (Invited) Hideyoshi Horimai, “Holographic 3D-image Printer System with Collinear Optics,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, IWH 2015 Digest, Tu2-4 (Okinawa, 2015).
48. (Invited) Xiaodi Tan, Xin Luo, Hideyoshi Horimai, “360 Degree Contents Processing for Realistic 3D Image Display,” International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, IWH 2015 Digest, Tu2-3 (Okinawa, 2015).

学会発表（国内）

1. 通信学会研究会
2. Yoshio Aoki, Osamu Kawakubo, Hideyoshi Horimai and Takao Ihashi, “Current Technology and Future Trend of Magneto-Optical Disk System,” 日本応用磁気学会 研究会.
3. 堀米秀嘉, “大容量情報保存格納技術研究開発：Holographic Versatile Disc,” 三次元映像のフォーラム 第74回研究会, 3D 映像, Vol. 19, No. 4, 60-78 (Dec. 2005).
4. ウキエツ, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “デジタルホログラフィによる三次元計測システムの開発” , ViEW (Vision Engineering Workshop), IS2-C9, 2012.
5. YuQiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “デジタルホログラフィによる三次元計測” , FIT(情報科学技術フォーラム), H-014, 第3分冊 pp.145- 146, 2012.
6. ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元計測装置の小型化に関する検討” , DIA(Dynamic Image processing for real Application), I3-13, pp.310-314, 2013.

7. ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを用いた小型化三次元計測システムの開発”, SSII (Symposium on Sensing via Image Information), IS1-19, pp.IS1-19-1-IS1-19-6, 2013.
8. ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット DH を用いた油液表面の三次元形状計測”, ViEW (Vision Engineering Workshop), OS2-H5(IS1-F8), 2013.
9. ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット型デジタルホログラフィ顕微鏡による赤血球の三次元計測”, DIA(Dynamic Image processing for real Application), IS4-1, pp.125-128, 2014.
10. Qiyue Yu, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “3D Measurement for Red Blood Cells Using Digital Holography”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.6, pp 73- 77, 2014.
11. YuQiyue, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “デジタルホログラフィを用いた三次元形状計測システムの開発”, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, M4-7, 2012.
12. ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを利用したワンショット三次元計測システムの開発に関する検討”, FIT(情報科学技術フォーラム), I-019, 第 3 分冊 pp.273-277, 2013.
13. ウキエツ, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測の高速化に関する検討”, 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会, H3-5, 2013.
14. 田淵泰志, 堀米秀嘉, “吸収型ガラス偏光子「Glapola」の活用による高性能化,” 日本光学会 第 11 回偏光計測研究会 講演資料集, 21 (Dec. 2015).

表彰

1. IWHM 2007, The IWHM Award, “Invention of Collinear Holography,” Oct. 2007.
2. IWHM&D 2009, The IWHM Best Paper Award, “Development of Direct Light Scanning 3-D Display Proto-type System,” Nov. 2009.
3. 公益財団法人名古屋産業振興公社, 平成 24 年度大学発ベンチャービジネスプラン グランプリ, “シートレンズを用いた超薄型静脈認証センサーの開発と製造”.
4. ぎふ地域ベンチャー支援ネットワーク NOBUNAGA21, ビジネスプラン 優秀賞, “シートレンズを用いた超薄型指紋・静脈センサーの開発と製造”.
5. IDW '14, Best Demonstration Award, “ The Realistic 3D Image Display Using Direct Light Scanning Method,” Dec. 2014.
6. ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 2015 年度 HODIC 鈴木・岡田記念賞 (技術賞)