

博士学位論文

ホログラフィックデータストレージにおける
フィルタ設計及び変調符号の構成に関する研究

平成 27 年度

指導教員 山本 学 教授

東京理科大学大学院
基礎工学研究科 電子応用工学専攻

高畑 洋介

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と意義	1
1.2 従来のストレージ技術	4
1.2.1 次世代光ストレージ技術の研究開発動向	4
1.2.2 ホログラフィックデータストレージの研究開発動向	5
1.3 本研究の目的と構成	9
参考文献	10
第2章 ホログラフィックデータストレージの記録再生原理	12
2.1 ホログラフィーの特徴と原理	12
2.2 厚いホログラムのブラッグ回折	13
2.3 ホログラフィックデータストレージの記録再生原理	15
2.4 ホログラフィックデータストレージの記録密度	16
2.5 ホログラムの記録方式	17
2.5.1 Off-axis 方式	17
2.5.2 Co-axis 方式	19
2.5.3 Polytopic 方式	20
2.5.4 Monocular 方式	21
2.6 結言	22
参考文献	23
第3章 ホログラフィックデータストレージの信号処理	25
3.1 記録再生チャンネルのモデル	25
3.2 信号処理のフロー	26
3.3 ページデータの生成	27
3.3.1 変調符号による冗長性の付与	27
3.3.2 ランレングス制限符号を用いた変調方式	29
3.3.3 光学的オーバーサンプリング	31
3.4 再生信号の位置検出	32
3.4.1 FFT 相互相関法による移動量ベクトルの推定	33
3.4.2 FFT 相互相関法による位置検出処理	35
3.5 アフィン変換による画像歪み補正	37
3.6 2次元 FIR フィルタ処理	38
3.6.1 LMMSE によるフィルタ係数の設計	39
3.6.2 実数値遺伝的アルゴリズムによるフィルタ係数の設計	40
3.6.3 QMMSE によるフィルタ係数の設計	43
3.6.4 Volterra Equalizer によるフィルタ係数の設計	44

3.7	自動利得制御による光強度分布むらの補正	45
3.8	再生信号の品質評価方法	46
3.9	結言	48
	参考文献	49
第4章	ホログラフィックデータストレージの再生信号の品質改善の検討	51
4.1	波面収差に対するフィルタ処理の効果	51
4.2	記録再生画像に対するフィルタの効果の検討	58
4.3	Co-axis方式による再生信号評価	61
4.4	Monocular方式による再生信号評価	63
4.5	結言	68
	参考文献	69
第5章	ランレングス制限符号適用による記録密度改善検討	70
5.1	ナイキスト開口による帯域制限	70
5.2	符号化効率の評価	70
5.3	シミュレーションによるエラー特性の評価	74
5.4	結言	76
	参考文献	78
第6章	結論	79
6.1	本研究のまとめ	79
6.2	今後の展望	80
	謝辞	81
	発表論文リスト	82

第1章 序論

1.1 研究の背景と意義

近年のクラウドコンピューティングの普及によりデータセンタの設立が加速しており、それに伴い電力消費量が急激に増大している。データセンタの保存情報の大半はアクセス頻度の少ないアーカイブ情報である。アーカイブ情報には、文書や映像アーカイブ等の従来型アーカイブの他、コンテンツクラウドアーカイブを保存する新規アーカイブがあり、その情報量が年々拡大している。図 1.1 に示すように蓄積すべき電子データ量は年率 40%程度で増大しており、2025 年には 200 ZB に到達すると言われている[1]。それに伴い、データセンタも同様の増加率で蓄積すべき情報量が増大すると考えられる。データセンタに保存のために従来から用いられてきた HDD だと、蓄積する際の冷却等に過大な電力消費の大幅な増大は避けられない。データセンタの日本国内における電力消費は、見積もりでは 2005 年が 150 億 kWh であり、それが 2030 年には 800 億 kWh 以上に増大すると予想されている。データセンタにおける 70%相当の情報蓄積を HDD からホログラフィックデータストレージ[1-3]に置き換えていくことにより、2030 年にはデータセンタのアーカイブに関わる電力消費を HDD に比べて約 1 割まで削減できると期待される。

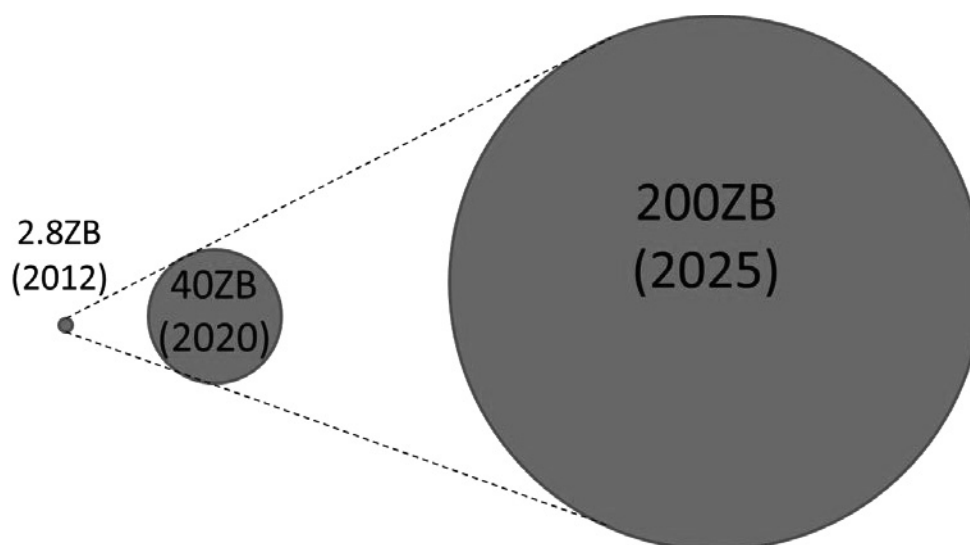


図 1.1 WW 電子データ量の増大[1]

出典：“THE DIGITAL UNIVERSE IN 2020” (IDC, 2012)

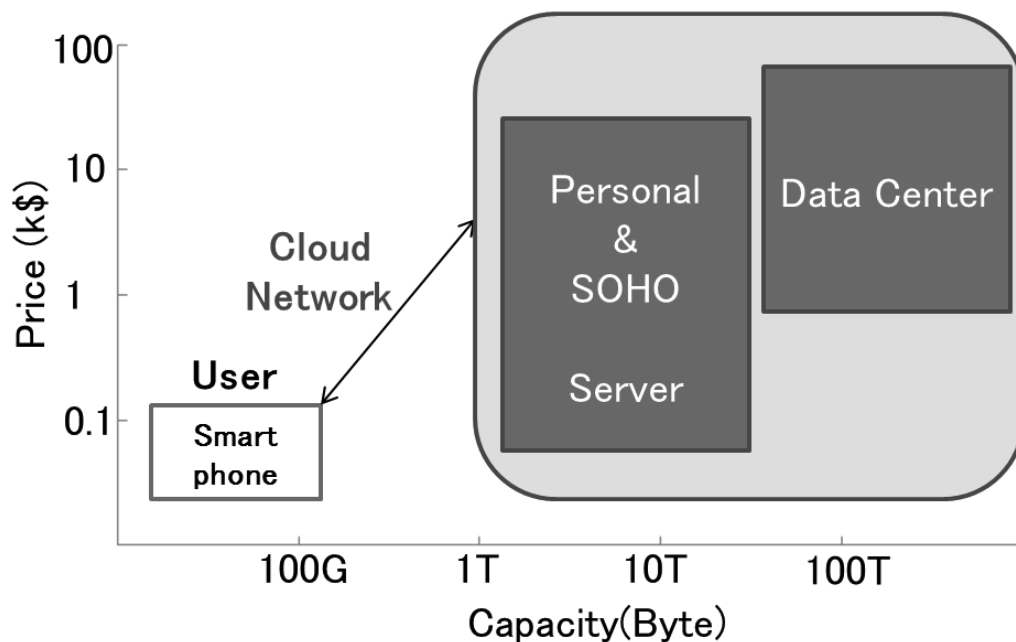


図 1.2 クラウド時代のストレージ市場

図 1.2 に示すようにクラウドコンピューティングの登場で情報量が莫大に増加している。図 1.2 のようにデータのほとんどの処理はサーバ側に集中する傾向にある。そのため、サーバ側ではデータセンタとしてペタバイト規模のストレージが必要となり、それに伴い電力消費量も増加する傾向にある。

更に長期保存が要求されるデータも存在するため、これらの保存に要する電力消費も急速に増大していく。図 1.3 に示すように、政府系公文書、映像・ニュースなどは 100 年以上の長期保管が求められ、医療情報やオイル・ガス、航空機関連など長期保管が求められる情報が数多く存在する。従来のストレージ、例えば HDD、磁気テープ、光ディスク、SSD には、アーカイブ用メモリに求められる省電力性、大容量・低ビットコスト性、長期保存性、耐災害性およびグリーン性を同時に満たすものはなく、新たなメモリ技術の開発が必要である。現状だとデータセンタ等に使用されているストレージは常時運転動作が必要な HDD 等に蓄積されるため、冷却等のための電力消費や運用コストが増加の一途を辿っている。これらの HDD のシステムをホログラフィックデータストレージ [6-10] に置き換えることにより電力消費量を大幅に削減でき、新しい型のデータセンタの構築が可能となる。

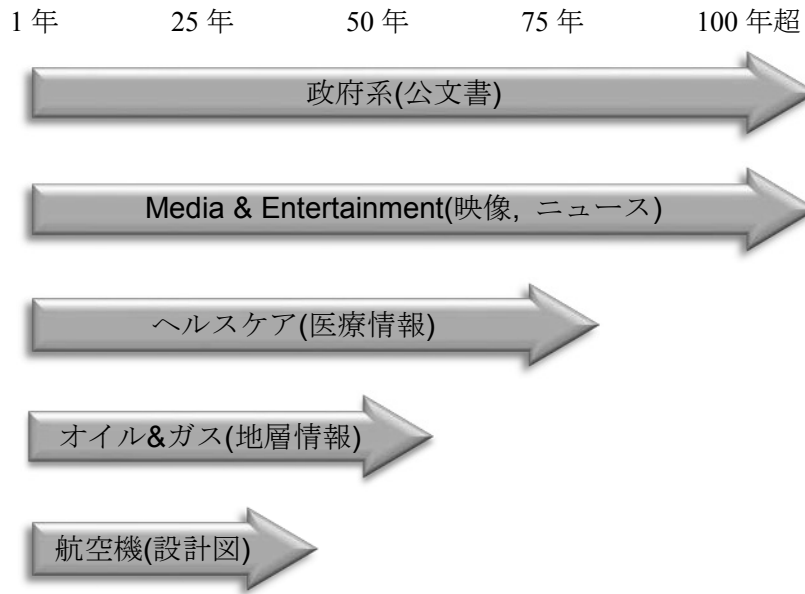


図 1.3 データの長期保管の要求[2-5]
 出典：IBM Haifa Lab. ホワイトペーパー(2006)他

以上示した背景から、省電力性、大容量・低ビットコスト性、長期保存性、耐災害性およびグリーン性を同時に満たす超大容量・高速なホログラフィックデータストレージシステムを HDD から置き換えることで、電力消費量の大幅削減を実現することが可能である。耐災害性に関しては、ホログラフィックデータストレージも光ディスクと同等の性能が得られると予想される。また、グリーン性の尺度としての CO₂ 排出についてもホログラフィックデータストレージは HDD に比べて少ない。

1.2 従来のストレージ技術

1.2.1 次世代光ストレージ技術の研究開発動向

従来の光ストレージの研究開発の流れを図 1.4 に示す. 1980 年代に CD の開発が行われ, その後 DVD, Blu-ray へと大容量化を目指した製品が開発されている. それぞれ再生専用型と記録型がある. 表 1.1 に示すように CD は 0.65 GB, DVD は 4.7 GB, そして Blu-ray は 25 GB 容量とデータ容量を拡大してきた[4]. 光ディスクの記憶容量の拡大は基本的にはレーザー光源の短波長化と集光レンズの開口数の増大により達成されて来ている. レーザーの短波長化は Blu-ray で 405 nm の青色光源となりさらなる短波長化は困難な状況にある. また開口数についても, Blu-ray で既に 0.85 のレンズが採用されているため, 今後の増大には限界がある[11-15].

一方, 本研究で検討するホログラフィックデータストレージでは, 図 1.5 に示すようにいくつかの相違点がある. 光ディスクは, レーザー光を媒体面で極力集光し, ビットバイビット記録を行うことに特徴がある. 一方ホログラフィックデータストレージは, 2次元のデジタルデータパターンを一括して記録し, かつそれらを同一箇所にも多重記録(重ね書き記録)することに特徴がある.

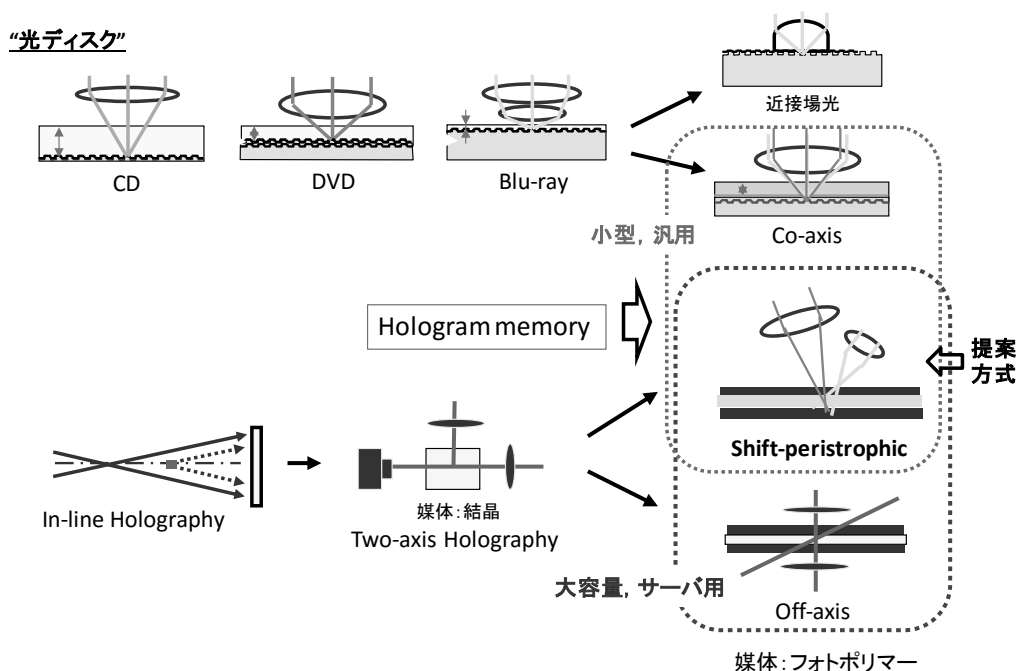


図 1.4 従来の光ストレージの開発動向

表 1.1 光ディスクの開発経緯

	CD	DVD	HD-DVD	Blu-ray
レンズの NA	0.45	0.6	0.65	0.85
光源波長 [nm]	780	650	405	405
カバー層厚さ [mm]	1.2	0.6	0.6	0.1
容量 [GB]	0.65	4.7	20	25

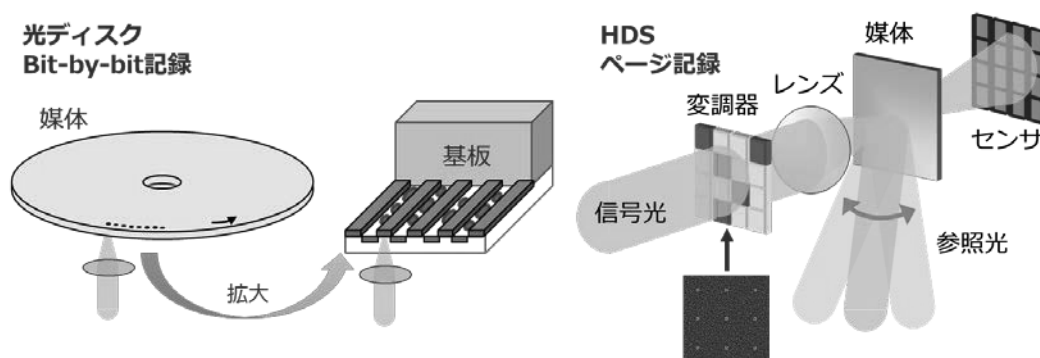


図 1.5 光ディスクとホログラフィックデータストレージの比較

1.2.2 ホログラフィックデータストレージの研究開発動向

1948年に D. Gabor が波面記録技術であるホログラフィーの基本原理を開発した[16]. このときのホログラムの記録は, in-line ホログラムであり, 信号光と参照光が同一方向に伝搬する方式である. この方式では信号光と参照光の分離が難しく, 良好な信号対雑音比は得られなかった. 1962年に E. N. Leith と J. Upatnieks がレーザー光源を用いた off-axis 方式[17], すなわち物体光と参照光が異なる方向から入射する方式を開発し, 両者の分離が可能となって信号対雑音比が大きく改善した. Off-axis 方式では直接像と共役像の分離が可能であり, 物体からの反射光でも記録が可能である. 1963年にはこのホログラフィー技術を用いたメモリ技術が P. J. Vanheerden により提唱された[18]. その後, 光ディスクの研究開発が大きく進展する一方で, レーザー, 媒体あるいは空間光変調器 (SLM), CCD などの入出力機器の開発が追いつかず, ホログラフィックデータストレージの研究は下火となった. その後 1990年代になって米国でホログラフィックデータストレージの国家プロジェクトが始められた. ひとつは Photorefractive Information Storage Materials (PRISM) であり, 他の一つは Holographic Data Storage System (HDSS) である. これがホログラフィックデータストレージの第二次ブームとなった. その後媒体がフォトリフラクティブ結晶からフォトポリマーに移行し研究開発がすすめられた. 2000年代に入ると, 米国の国家プロジェクトにおけるホログラフィックデータストレージの研究をベ

ースにして、米国でベンチャー企業が相次いで設立された。例えばルーセントテクノロジー社からスピアウトした InPhase 社や、ポラロイド社から出た Aprills 社が研究開発を行った。これらのベンチャー企業は 10 年程度研究開発を進めたが、実用化には至らなかった。一方、2000 年前後から日本でも Collinear 方式[19]、Co-axis 方式[20]、が開発されている。前二方式はその後研究開発が中止され、現在では Polytopic 方式[21]を基本とする方式の研究開発が進められている状況にある。

ホログラフィックデータストレージが記録媒体で大きな進展が見られ実用化が可能になった理由として

(1) 1990 年代後半にアメリカのコンソーシアム(PRISM, HDSS)が採用した記録材料はフォトリフラクティブ結晶であり、感度など基本的特性に欠点があったこと。

(2) 2000 年代に Lucent 社が開発したフォトポリマーは、記録に伴う収縮を低減し、高い記録感度と記録密度を両立することに成功したこと。

(3) フォトポリマーは、光重合開始剤、重合性モノマー、ベースポリマーに大きな改良が加えられ、フォトリフラクティブ結晶と比較して、M/#で 100 倍以上、感度は 2 万倍以上の高い性能となったこと。

が挙げられる。記録媒体の変遷を表 2 に示す。

表 1.2 記録媒体の変遷

	フトリフラク タイプ結晶 ~1990年代	フォトポリマー ~2005年	フォトポリマー 現在
記録方式	追記可能	ライトワンス	ライトワンス
M/# [1/mm]	0.1~0.3	15	30~40
感度 [cm/mJ]	8×10^{-5}	0.1	2~3
保存寿命	最大5年	10年以上	30年以上
記録波長 [nm]	780	532	405

感度は露光による屈折率変化 Δn と露光エネルギー E の比で表されるが、 Δn の測定が困難なため、 Δn が回折効率 η の平方根に比例することから、 $\eta^{1/2}/E$ で評価されることが多い。また $M/\#$ は媒体の多重記録性能を示す指標で、多重記録数を M 、平均回折効率を η とすると、 $M\eta^{1/2}$ で定義される。たとえば $M/\# = 10$ の場合、平均回折効率 1% で 100 多重できる[10, 22]。

以上の研究の背景より、2015年現在、高速大容量のホログラフィックデータストレージの実現が視野に入っている状況と言える。本論文は、ホログラフィックデータストレージの実現のために、要素技術である信号処理の検討結果を報告する。

本研究で検討するホログラフィックデータストレージのストレージ技術における位置付けについて説明する。図 1.6 はアーカイブ容量の推移を示しているが、情報のライフサイクルとして、アクセス頻度の高い領域とアクセス頻度の低い領域に分けられる。アクセス頻度の高い領域では高速アクセス、書き換え耐性の高い半導体メモリ、あるいは HDD 等が **Active Disk** として適している。一方、アクセス頻度の低い領域は長期保存向けになると考えられる。ホログラフィックデータストレージは **Long-term Disk** として適している。図 1.6 に示すように **Long-term Disk** の需要はここ 1, 2 年で急速に伸びると予想されており、ホログラフィックデータストレージの有用性につながる。

図 1.7 に各種ストレージの **bit cost trend** を示す。ハードディスクは近年記録密度の向上は飽和する傾向にあるが、ホログラフィックデータストレージはさらなる高密度化が可能である。

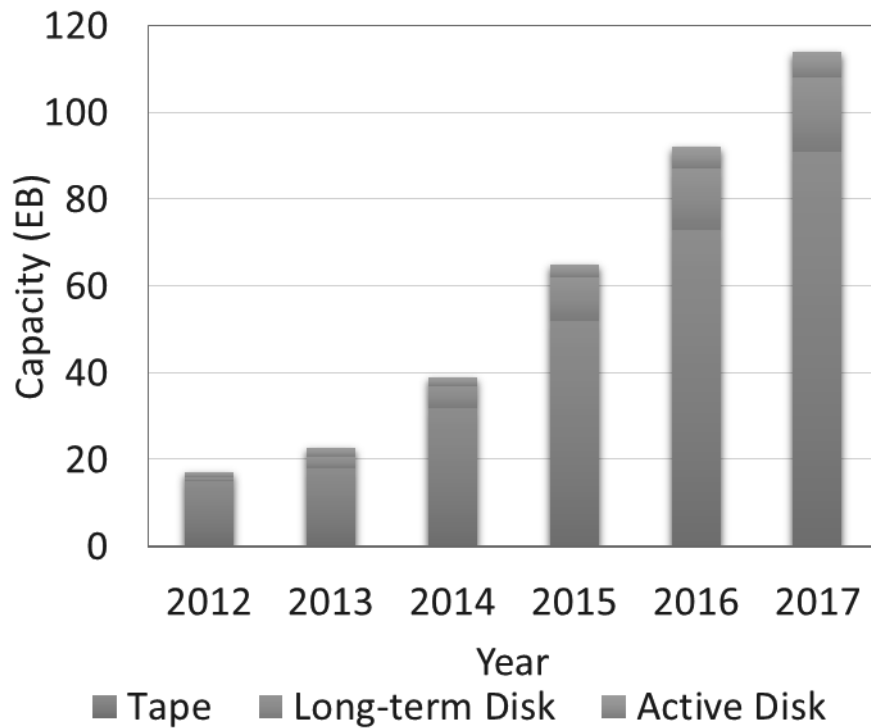


図 1.6 アーカイブ容量の推移[23]

出典：“Worldwide Archival Storage Solutions 2011–2015 Forecast: Archiving Needs Thrive in an Information-Thirsty World”

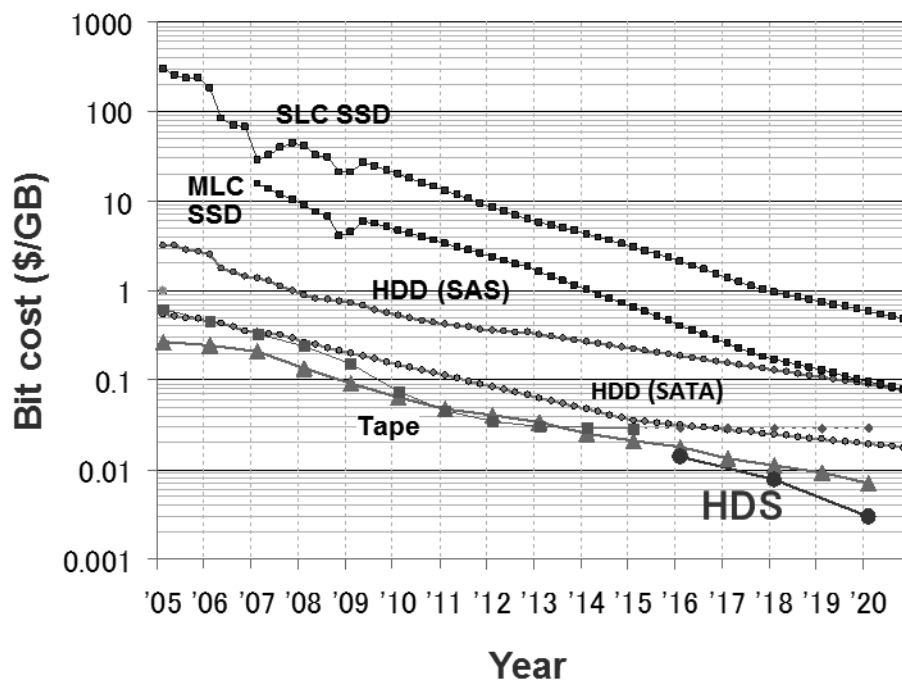


図 1.7 各種ストレージのビットコストのトレンド[24]

出典：“HDDs and NAND Flash will be Around for Some Time”

1.3 本研究の目的と構成

本研究は、ホログラフィックデータストレージに対して有効な信号処理法を明らかにすることが目的である。

以下、各章の内容について述べる。第 2 章では、第 3 章以降に述べる本論文が提案する記録再生方式の説明の準備として、ホログラフィックデータストレージの記録再生原理およびについて述べる。また、従来の多重記録方式について、特徴と課題について概説する。

第 3 章ではホログラフィックデータストレージにおける記録再生処理について述べる。まずホログラフィックデータストレージの記録再生処理の流れについて説明し、その後に記録信号に対する符号化、復号、オーバーサンプリング、位置検出および歪み補正処理法、輝度補正処理法について述べる。また、本論文で信号品質改善目的に適用した FIR フィルタの係数最適化手法、および記録密度向上を目的に適用したランレングス制限符号について説明し、最後に本論文の評価指標となる SNR/BER について述べる。

第 4 章では、各ホログラフィックデータストレージ記録再生系の実験により得られた信号に対して FIR フィルタを適用したときの評価結果について述べる。

第 5 章では、ホログラフィックデータストレージの高密度記録を行うために、検討したナイキスト開口フィルタおよびランレングス制限符号の有効性について検討した結果を述べる。

第 6 章では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

参考文献

- [1] J. Gantz and D. Reinsel, "The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the Far East," IDC iView (2012).
- [2] Simona Cohen, Dalit Naor, Leeat Ramati, and Petra Reshef, "Towards OAIS-Based Preservation Aware Storage - A White Paper," IBM Haifa Research Lab.
- [3] M. Factor, D. Naor, S. Rabinovici-Cohen, L. Ramati, P. Reshef, J. Satran, "The Need for Preservation Aware Storage - A Position Paper," ACM SIGOPS Operating Systems Review, Special Issue on File and Storage Systems **41**, 19-23 (2007).
- [4] M. Factor, D. Naor, S. Rabinovici-Cohen, L. Ramati, P. Reshef, J. Satran, D. Giaretta, "Preservation DataStores: Architecture for Preservation Aware Storage," Proceedings of the 24th IEEE Conference on Mass Storage Systems and Technologies, 2007, 24-27 (2007).
- [5] S. Rabinovici-Cohen, M. Factor, D. Naor, L. Ramati, P. Reshef, S. Ronen, J. Satran, D. Giaretta, "Preservation DataStores: New storage paradigm for preservation environments," IBM Journal of Research and Development on Storage Technologies and Systems **52**, 389-400 (2008).
- [6] M. Factor, E. Henis, D. Naor, S. Rabinovici-Cohen, P. Reshef, S. Ronen, G. Michetti, M. Guercio, "Authenticity and Provenance in Long Term Digital Preservation: Modeling and Implementation in Preservation Aware Storage," Proceedings of the First Workshop on the Theory and Practice of Provenance, No. 6 (2009).
- [7] S. S. Orlov, "Volume holographic data storage," Commun. ACM **43**, 46-54 (2000).
- [8] A. M. Glass, M. J. Cardillo, Hans J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox: *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [9] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres: *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (John Wiley & sons, New York, 2010).
- [10] Lambertus Hesselink, Sergei S. Orlov, and Matthew C. Bashaw. Holographic data storage systems. Proc. IEEE **92**, 1231-1280 (2004).
- [11] 志村努, 「ホログラフィックメモリーのシステムと材料」, (シーエムシー出版, 東京, 2006)
- [12] Blu-ray Disc Association, "White Paper Blu-ray Disc™ Format General 3rd Edition," Technical Report, Blu-ray Disc Association (2012) <http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/White_Paper_General_3rd_Dec%202012_20121210.pdf> (Accessed: 15 July 2015)
- [13] 今中良一, 「光ディスクの秘密」, (電波新聞社, 東京, 2005)
- [14] 小川博司, 「図解ブルーレイディスク読本」, (オーム社, 東京, 2006)

- [15]田中拓男, 「3次元多層記録メモリー」, 光学, 32, 279-304 (2003).
- [16]大津元一, 「大容量光ストレージ」, (オーム社, 東京, 2008)
- [17]D. Gabor, “A new microscopic principle”, Nature **161**, 777-778 (1948).
- [18]E. N. Leith, J. Upatnieks, “Reconstructed Wavefronts and Communication Theory”, J. Opt. Soc. Am. **52**, 1123-1130 (1962).
- [19]P. J. van Heerden, “Theory of Optical Information Storage in Solid,” Appl. Opt. **2**, 393-400 (1963).
- [20]H. Horimai, X. D. Tan and J. Li, “Collinear holography,” Appl. Opt. **44**, 2575-2579 (2005).
- [21]A. Fukumoto, “Coaxial Holographic Data Recording”, Optics and Photonics News **19**, 28-33 (2008).
- [22]K. Anderson, K. Curtis, “Polytopic multiplexing”, Opt. Lett. **29**, 1402-1404 (2004).
- [23]T. J. Bittman and L. Leong. “Worldwide archival storage solutions 2011- 2015 forecast: Archiving needs thrive in an information-thirsty world,” IDC. Market Analysis. October 2011.
- [24]Hu Yoshida, “HDDs and NAND Flash will be Around for Some Time,” <<http://blogs.hds.com/hu/2013/02/hdds-and-nand-flash-will-be-around-for-some-time.html>> (Accessed: 28 April 2015).

第2章 ホログラフィックデータストレージの記録再生原理

2.1 ホログラフィーの特徴と原理

ホログラフィーは、物体からの光波の位相と振幅を記録する技術である[1-4]. 通常の写真などは、強度分布のみを記録するため、位相情報は失われてしまう。そこで記録対象である複素振幅分布にキャリア成分を導入することにより、位相情報を失うことなく記録することを可能としたのがホログラフィーである。ホログラフィーによる像の記録及び再生の概念図を図 2.1 に示す。

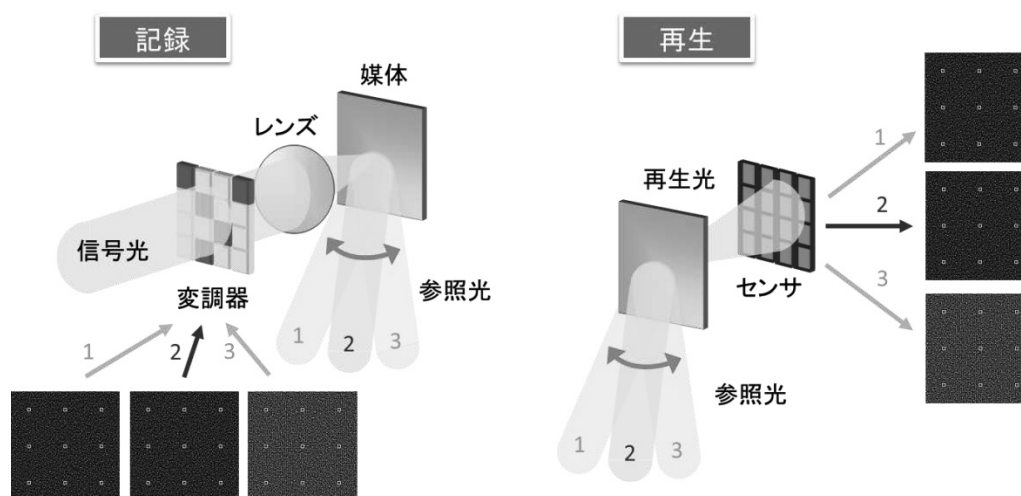


図 2.1 ホログラムの記録と再生

レーザーなどのコヒーレントな光を使用し、同じ光源から発した参照光を導入することで、物体の複素振幅分布を記録材料に記録する。図 2.1 に示すように、物体光に対して照射角度を持たせた参照光を用いて、物体の情報を記録するホログラムを 2 光束(off-axis)型ホログラムという。

振幅と位相をそれぞれ $A(\mathbf{r})$, $\phi(\mathbf{r})$ と表したときの物体光の複素振幅分布 $f(\mathbf{r})$ と、波数ベクトル \mathbf{k} を持った参照光 $r(\mathbf{r})$ は次のように表すことができる。

$$f(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp[i\phi(\mathbf{r})] \quad (2.1)$$

$$r(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (2.2)$$

物体光と参照光を干渉させて記録するとき、その強度分布 $I(\mathbf{r})$ は次のように求まる。

$$\begin{aligned}
I(\mathbf{r}) &= |f(\mathbf{r}) + r(\mathbf{r})|^2 \\
&= |A(\mathbf{r}) \exp[i\phi(\mathbf{r})] + \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})|^2 \\
&= |A(\mathbf{r})|^2 + 1 \\
&\quad + A(\mathbf{r}) \exp\{i[\phi(\mathbf{r}) - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}]\} \\
&\quad + A(\mathbf{r}) \exp\{-i[\phi(\mathbf{r}) - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}]\} \\
&= |A(\mathbf{r})|^2 + 1 + 2A(\mathbf{r}) \cos[\phi(\mathbf{r}) - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}]
\end{aligned} \tag{2.3}$$

式(2.3)より位相項 $\phi(\mathbf{r})$ が残り, 位相情報を失うことなく強度分布を記録できることがわかる. 第 1 項, 第 2 項はそれぞれ物体波の強度, 参照波の強度を表しており, 写真ではこの 2 つの項のみを記録していることになる. 第 3 項には位相情報が含まれており, この項がホログラム記録の特徴といえる.

ホログラムの再生の際は, 記録時とまったく同じ参照光をホログラム面上に照射することにより物体光が観測面に現れる. ホログラムを通過した光の振幅分布 $H(\mathbf{r})$ は次式で表せる.

$$\begin{aligned}
H(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r})r(\mathbf{r}) &= \left(|A(\mathbf{r})|^2 + 1\right) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\
&\quad + A(\mathbf{r}) \exp\{i\phi(\mathbf{r})\} \\
&\quad + A(\mathbf{r}) \exp\{-i\phi(\mathbf{r}) + 2i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}\}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

第 1 項は位相変調されずに直進する直接透過光である. 第 2 項は元の物体の波面が再現されている回折光で, このとき形成される虚像を観測する. 第 3 項は第 1 項の透過光を軸に第 2 項の回折光と線対称の位置に出る共役項である.

2.2 厚いホログラムのブラッグ回折

ホログラフィックデータストレージでは, 情報を厚い記録媒体に体積ホログラムとして記録する. この場合, 前節に示した平面ホログラムと違い, ブラッグ選択性により +1 次の回折光のみが再生される[2, 3]. 回折効率はブラッグ条件からのずれに応じて変化する.

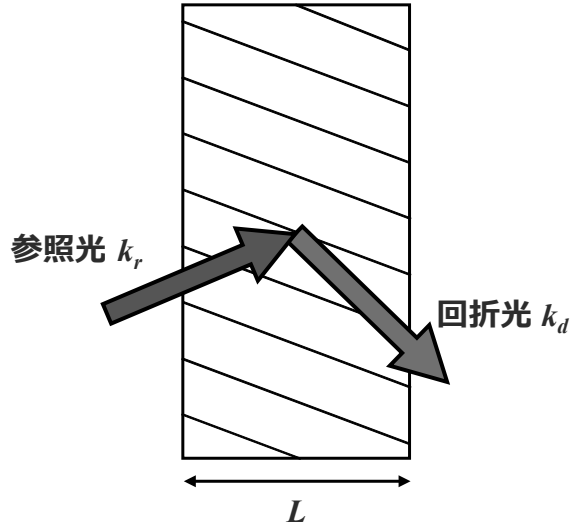


図 2.2 体積ホログラムによる回折

図 2.2 のような回折格子に単色平面波が入射すると回折光が生じる. 式(2.5)の条件を満たす場合に厚いホログラムと呼ばれ, ブラッグ回折を生じる.

$$Q = \frac{K^2 L}{nk} \gg 1 \quad (2.5)$$

ここで K は格子ベクトルの大きさ, L は媒体の厚さ, n は屈折率, k は光源の波長である. ブラッグ回折となる時, 回折光は+1 次しか存在しない. また回折効率 η は式(2.6)で求めることができる.

$$\eta = \eta_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{L}{2\pi} \Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{e}_z \right) \quad (2.6)$$

式(2.6)において $\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$, η_0 は定数, $\Delta \mathbf{k}$ はブラッグ条件からのずれ, \mathbf{e}_z はホログラムの厚み方向に沿った単位ベクトルである. $\Delta \mathbf{k}$ は格子ベクトルを \mathbf{K} , 参照光と回折光の波数ベクトルをそれぞれ $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_d$ とすると

$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_r + \mathbf{K} - \mathbf{k}_d \quad (2.7)$$

と表される.

参照光, 回折光, 回折格子の波数ベクトルをそれぞれ k_r, k_d, K とすると図 2.3

のようにベクトルがつくる三角形が閉じた状態となる時がブラッグ条件を満たした場合である。この条件を満たさない時、ブラッグ条件からのずれ Δk により回折効率が変化する[3-4].

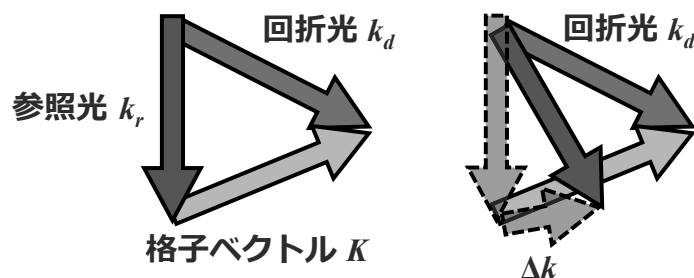


図 2.3 波数ベクトルとブラッグ条件

平面波同士の干渉の場合、ブラッグ条件は次の式で表される[2].

$$\sin\left(\frac{\theta_o - \theta_r}{2}\right) = \frac{\lambda}{2n\Lambda} \quad (2.8)$$

ここで θ_o と θ_r はそれぞれ物体光参照光の媒体内での入射角、 Λ は格子周期、 n は屈折率である。

2.3 ホログラフィックデータストレージの記録再生原理

ホログラフィックデータストレージはデジタルデータを 2 次元のページデータとして表現し、これを画像として記録媒体に記録、再生を行う 3 次元メモリである[5-7]. 記録されるデータは SLM などに代表される変調器などを用いて 2 次元パターンを作成する。記録に用いる 2 次元データは下記の図 2.4 に示すような白黒 2 値の強度変調である。

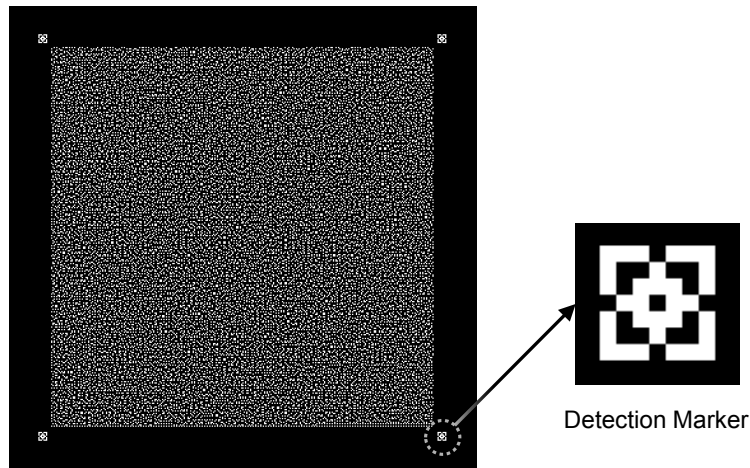


図 2.4 信号パターンのサンプル

データの書き込みは前述のように物体光と参照光の干渉により行う。物体光としてはレーザー光を空間光変調器に通して信号をのせた信号光を用いる。信号を載せた後レンズを用いてビームを絞り込み記録媒体へ照射する。信号光と同時にこれにコヒーレンスな参照光を同一点へと照射し、2つのビームを干渉させ出来た干渉縞をホログラムとして記録する。データを読み出す場合には、書き込みと同一の系で媒体に参照光のみを照射することで行う。再生された信号はレンズにより結像し、画像として CCD, CMOS などのイメージセンサにより読み込まれる。

このとき、厚い記録媒体を用いるとブラッグ選択性が生じるため、同一体積中に多数のホログラムを多重記録できる。そのため、従来の平面型光ディスクと比較して大きな記録容量を実現できる。

2.4 ホログラフィックデータストレージの記録密度

ホログラフィックデータストレージでは情報を体積ホログラムとして記録するため、多重記録により大容量を実現可能である。SLM のピクセルサイズを Δ としたとき、焦点面での光強度分布は以下の式で表される。

$$I(x, y) = I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\Delta x}{\lambda f}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\Delta y}{\lambda f}\right) \quad (2.9)$$

ここで I_0 は定数、 f はレンズの焦点距離、 $\lambda = \lambda_0/n$ は媒体内での波長である (λ_0 は自由空間での波長)。この関数の零点間の距離 D は

$$D = \frac{2f\lambda}{\Delta} \quad (2.10)$$

である。SLMの表示画素数を $N \times N$ とし、 $D \times D$ の領域に全ての情報が含まれているとすると、面内記録密度 ρ_s は

$$\rho_s = \frac{N^2}{D^2} = \frac{N^2 \Delta^2}{4f^2 \lambda^2} = \frac{W^2}{4f^2 \lambda^2} \quad (2.11)$$

となる。ここで $W = N\Delta$ は SLM の一辺のサイズである。ホログラムの厚さ 1 波長分ごとに、平面ホログラム 1 枚分の情報を記録できるとすると、最大多重度 M は屈折率 n と厚さ L を用いて

$$M = \frac{nL}{\lambda_0} \quad (2.12)$$

と表されるため、結局、体積ホログラムの記録密度 ρ は

$$\rho = M \rho_s = \frac{n^3 L W^2}{4f^2 \lambda_0^3} \quad (2.13)$$

となる。これより記録密度が λ_0^{-3} に比例していることが分かる。平面型光ディスクの記録密度は λ_0^{-2} に比例するため、ホログラフィックデータストレージが従来の光ストレージを大きく超える容量を実現可能であることを示している。また記録密度はホログラムの厚みに比例して増えることが分かるが、実際は散乱等のノイズにより一定の厚みで記録密度は飽和する。さらに記録密度は SLM の画素数や画素サイズではなく、表示面積に比例することがこの式より分かる。

2.5 ホログラムの記録方式

2.5.1 Off-axis方式

図2.5のように参照光と信号光が分離している様な記録方式をoff-axis型の記録方式という。Off-axis型の記録方式としては角度多重方式が挙げられる[8]。この方式は信号光と参照光の角度を微小に変えながらホログラムを記録していく方式であり、技術的には300 Gbits/inch²の記録密度を実現している。主にこの方式を採用して研究している企業としてInPhase（2010年に解散）、日立、NHKなどがある。

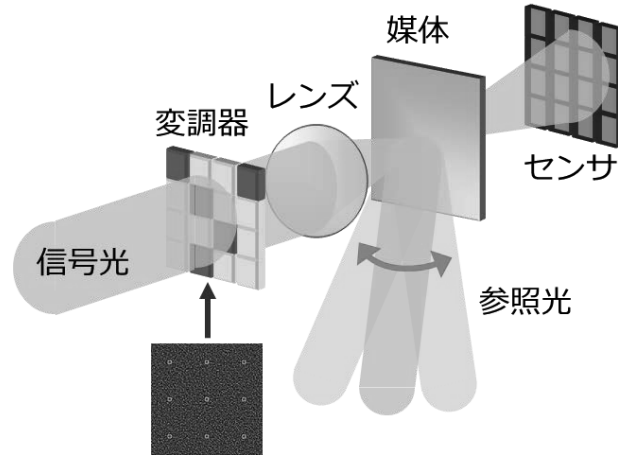


図2.5 角度多重記録方式

角度多重方式では，記録時と再生時の参照光の入射角のずれに応じて，回折効率が変化する．平面波同士の干渉の場合，回折効率が最初に0にまで低下するときの角度 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{L} \frac{\cos\theta_s}{\sin(\theta_s + \theta_r)} \quad (2.14)$$

で与えられる．ここで θ_s と θ_r はそれぞれ信号光と参照光の入射角である．また，このように回折効率が0になる点をBragg nullと呼ぶ．

Off-axis型の別の方式として，波長多重が挙げられる[9, 10]．この方式では波長を少しずつずらしながら記録することで，多重記録を行う．反射型ホログラムの場合，最初のBragg nullに対応する波長ずれは

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cos\theta_s}{2L \sin^2\left(\frac{\theta_s + \theta_r}{2}\right)} \quad (2.15)$$

となる．

別の方式として，媒体をずらしながら記録を行うシフト多重方式がある[11-15]．この方式では参照光として球面波もしくは円筒波を用いる．参照光として球面波を用いる場合，最初のBragg nullに対応するシフト量は

$$\Delta x = \frac{\lambda z_0}{L \tan\theta_s} + \frac{\lambda}{2NA} \quad (2.16)$$

で表される。ここで z_0 は参照光の波源から媒体中心までの距離、 NA は参照光の開口数、 x 軸は信号光と参照光の光軸がなす平面に平行な方向である。

また、媒体を回転させながら多重記録を行うperistrophic方式がある[16, 17]。この方式では、最初のBragg nullに対応する回転角度は

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{2\pi}{L} \left[\frac{\cos\theta_r}{\sin\theta_r(\sin\theta_s + \sin\theta_r)} \right]} \quad (2.17)$$

となる。

2.5.2 Co-axis方式

Co-axisまたはCollinear記録方式は、位相変調された参照光を円形状にし、中心部に信号光を配置することで信号光と参照光が同軸になる記録方式である[17-19]。この方式の利点として、従来の光ディスクとの互換が光学的に容易な点が挙げられる。

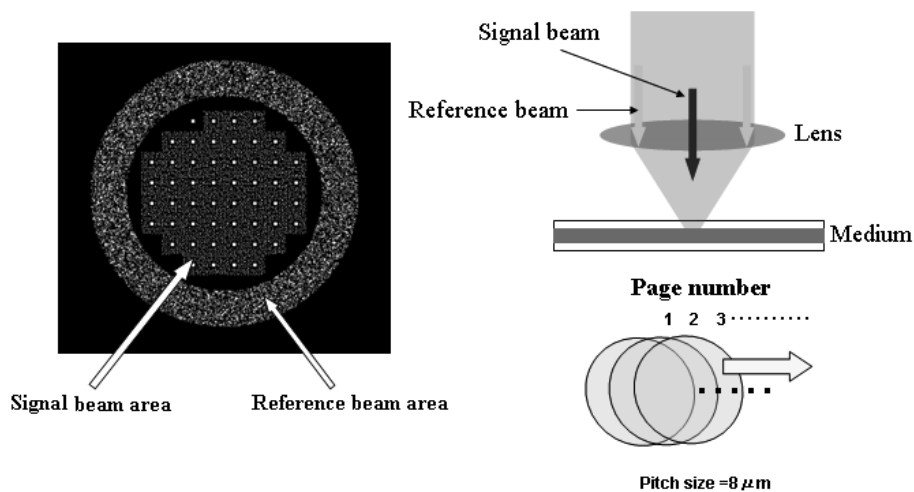


図2.6 Co-axis方式

図2.6のページデータを見ると分かるように、信号光に読み取りマーカーを並べて配置することで、画像の歪みを補正する。

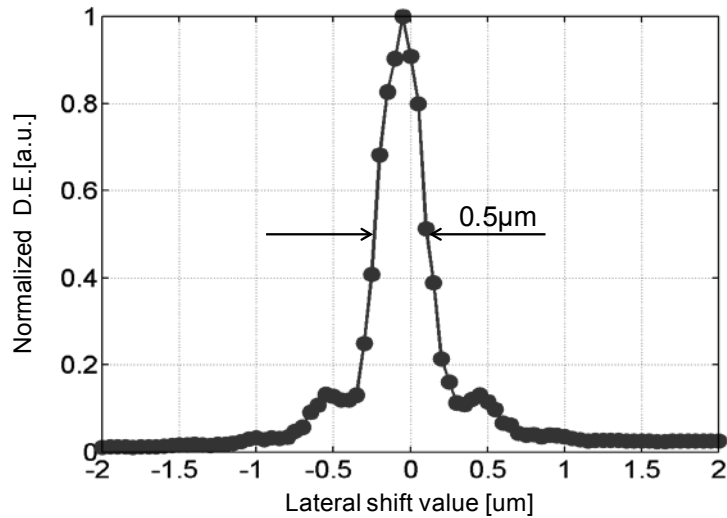


図2.7 Co-axis方式のシフト選択性

Co-axis方式では参照光をランダムなパターンで変調することで、媒体の2次元方向のどの向きにも同じシフト量で多重記録ができる。図2.7が示すように、およそ2 μm 程度のシフト量で次のホログラムを書き込むことが出来る[8-13]。

2.5.3 Polytopic 方式

Polytopic 方式[21]は、角度多重方式の一種である。この方式では多重記録におけるノイズを除去するために、媒体の直後に開口を設ける[20]。その概略図を図2.8に示す。この方式の光学系構成は2光束干渉法の場合とほぼ同じである。ただし参照光にランダム位相は付与せずに記録を行なう。そのため、多重記録によるクロストークの発生を抑えるために、開口により必要な回折光以外を取り除くことで多重記録を可能とする。

通常、角度多重のみで記録を行なう場合、対象とする情報のみを取り出すためには、クロストークなどノイズの影響をなくすために、隣の記録領域から十分な距離を離して記録を行なう必要がある。しかしこの方法では図2.8からも明らかかなように高密度化は望めない。そこで polytopic 多重記録方式では媒体直後に開口を設けることで、クロストークの除去を行い、大幅にシフト量を減少させ高密度記録に対応させることができる。実際には角度多重を同時に行なうため、一つの記録領域に角度多重のみで多重を行い、シフトさせて別の領域で多重記録を繰り返す。

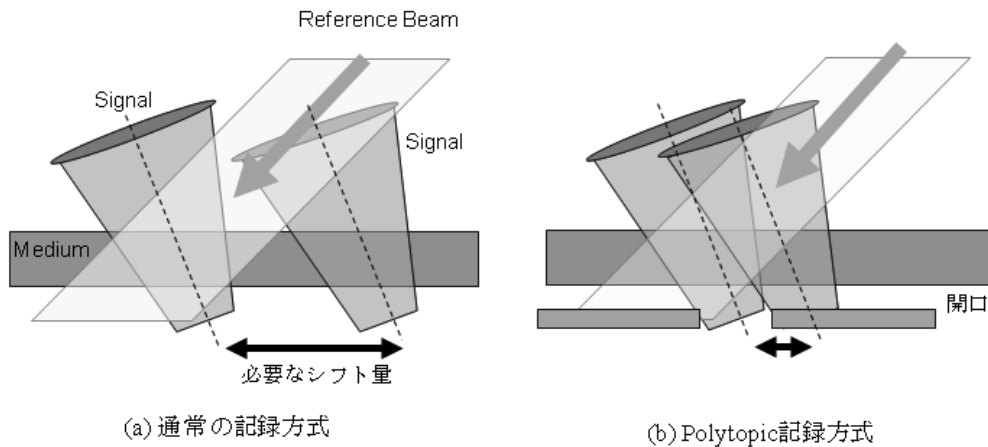


図2.8 Polytopic多重記録方式（シフト量に対する開口の影響）

信号光と参照光の光軸がなす平面に平行な方向をx軸，x軸と媒体厚み方向に直交する軸をy軸とすると，polytopic方式で必要となるシフト量は次の式で与えられる．

$$\begin{aligned}\Delta x &= d \cos \theta + d \sin \theta \tan(\theta + \alpha) \\ \Delta y &= d \tan(\alpha)\end{aligned}\tag{2.18}$$

ここで d は開口サイズ， θ は信号光の入射角， α は $\alpha = \arcsin(NA)$ である．

2.5.4 Monocular 方式

Monocular 方式[22]は信号光と参照光を1つのレンズで集光する方式である．この方式は光学系の小型化などの利点があり，主に民生用に向けて有力視されている．Monocular 方式における光学系を図2.9に示す．レーザーは空間フィルタを通り，可変偏光板で偏向方向を調節する．その後，PBSによってP偏向とS偏向に分けられる．信号光（直進）はPBSを透過し，SLMでデータ付与され反射する．このとき，偏光が 90° 回転するので，再度PBSに入射したときに反射する．一方始めのPBSで分岐した参照光は信号光と偏向面をあわせた後，信号光と同じ1つの対物レンズに通すことによって集光し，メディアに入射させる．

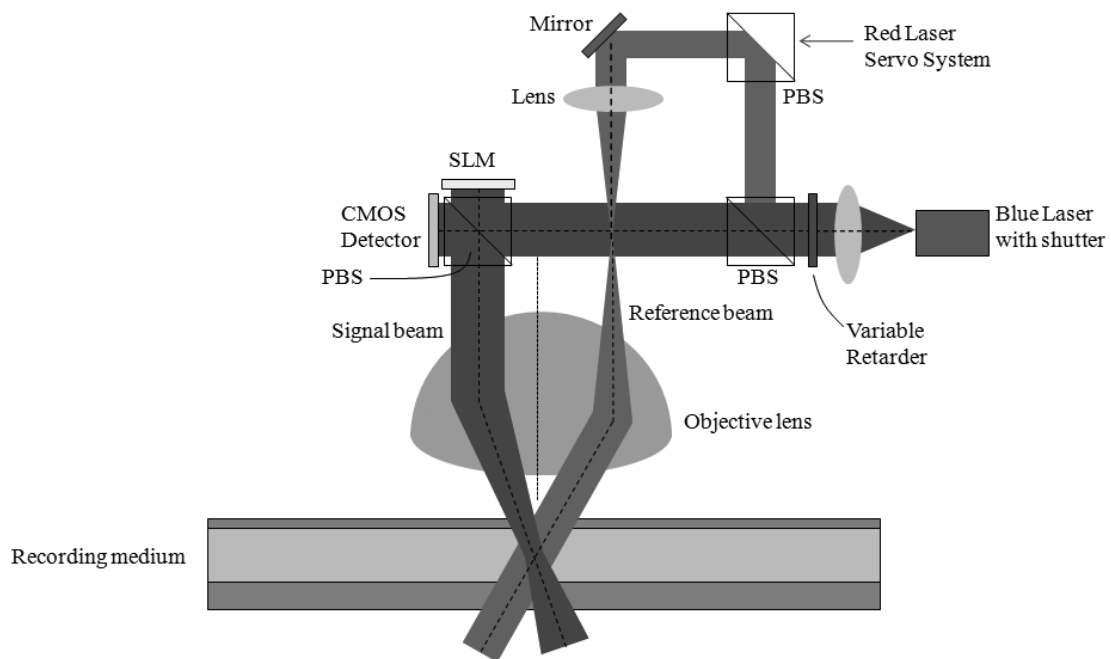


図 2.9 Monocular 記録多重方式の光学系

2.6 結言

本章ではホログラフィックデータストレージの記録再生原理および多重記録方式について述べた。多重記録方式では数種類に分類されるが、いずれの方式も記録密度の増大に対して課題がある。また、それぞれの多重記録方式は共通して再生時に信号品質の劣化が生じる問題がある。本論文では、これらの記録方式に対して信号品質改善検討および記録密度増大させるための信号処理法について検討を行う。

参考文献

- [1] 大越孝敬, 「ホログラフィ」 (コロナ社, 東京, 1977)
- [2] 辻内順平, 「ホログラフィー」 (裳華房, 東京, 1997)
- [3] ハリハラン, 「ホログラフィーの原理」 (オプトニクス社, 東京, 2004)
- [4] 久保田敏弘, 「ホログラフィ入門」 (朝倉書店, 東京, 2010)
- [5] 志村努, 「ホログラフィックメモリーのシステムと材料」 (シーエムシー出版, 東京, 2006)
- [6] A. M. Glass, M. J. Cardillo, Hans J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox: *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [7] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres: *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (John Wiley & sons, New York, 2010).
- [8] F. H. Mok, “Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate”, *Opt. Lett.* **18**, 915-917 (1993).
- [9] G. A. Rakuljic, V. Leyva, A. Yariv, “Optical data storage using orthogonal wavelength multiplexed volume holograms,” *Opt. Lett.* **17**, 1471-1473 (1992).
- [10] S. Yin, H. Zhou, F. Zhao, M. Wen, Z. Yang, J. Zhang, F. T. S. Yu, “Wavelength multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible-light tunable diode laser,” *Opt. Commun.* **101**, 317-321 (1993).
- [11] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, K. Curtis, “Holographic storage using shift multiplexing,” *Opt. Lett.* **20**, 782-784 (1995).
- [12] G. Barbastathis, M. Levene, D. Psaltis, “Shift multiplexing with spherical reference waves,” *Appl. Opt.* **35**, 2403-2417 (1996).
- [13] G. J. Steckman, A. Pu, D. Psaltis, “Storage density of shift-multiplexed holographic memory,” *Appl. Opt.* **40**, 3387-3394 (2001).
- [14] S. Yoshida, H. Kurata, S. Ozawa, K. Okubo, S. Horiuchi, Z. Ushiyama, M. Yamamoto, S. Koga, A. Tanaka, “High-density holographic data storage using three-dimensional shift multiplexing with spherical reference wave,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 09LD07 (2013).
- [15] S. Yoshida, T. Matsubara, H. Kurata, S. Horiuchi, M. Yamamoto, “Multi-dimensional shift multiplexing technique with spherical reference waves,” *IEICE Trans. Electron.* **E96-C**, 1520-1524 (2013).
- [16] K. Curtis, A. Pu, D. Psaltis, “Method for holographic storage using peristrophic multiplexing,” *Opt. Lett.* **19**, 993-994 (1994).
- [17] J. Jang, D. Shin, Y. Park, “Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing,” *Opt. Eng.* **39**, 2975-2981 (2000).
- [18] H. Horimai, X. D. Tan and J. Li, “Collinear holography,” *Appl. Opt.* **44**, 2575-2579

(2005).

- [19] K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, K. Watanabe, "Improved performance in coaxial holographic data recording," *Opt. Express* **15**, 16196-16209 (2007).
- [20] A. Fukumoto, "Coaxial Holographic Data Recording", *Optics and Photonics News* **19**, 28-33 (2008).
- [21] K. Anderson, K. Curtis, "Polytopic multiplexing," *Opt. Lett.* **29**, 1402-1404 (2004).
- [22] T Ishii, "Terabyte holographic recording with monocular architecture," *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 427-428 (2012).

第3章 ホログラフィックデータストレージの信号処理

3.1 記録再生チャンネルのモデル

HDS の記録再生系は図 3.1 に示すように $4f$ 光学系を 2 つ組み合わせたものが一般的である. 1 つめのフーリエ変換面 (焦点面) に空間フィルタを, 2 つめのフーリエ変換面に記録媒体を設置する. 空間フィルタはページデータの高調波成分を除去してフーリエ変換パターンのサイズを抑えるために用いる.

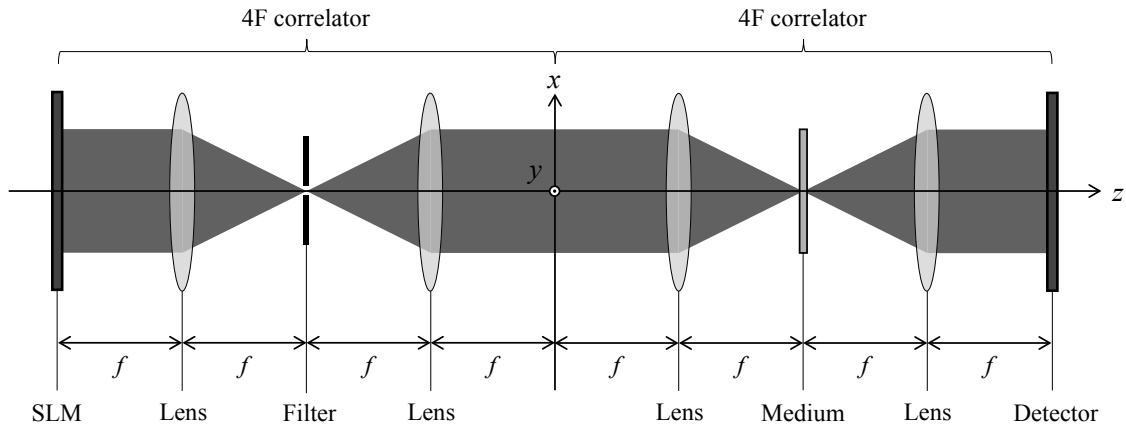


図 3.1 HDS の記録再生系モデル

このような光学系の記録再生チャンネルは次のようにモデル化できる[20].

$$I(i, j) = \int_{-\beta\Delta/2}^{\beta\Delta/2} \int_{-\beta\Delta/2}^{\beta\Delta/2} \left| \sum_{k=i-(M-1)/2}^{i+(M-1)/2} \sum_{l=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} d(i-k, j-l)h(x+k\Delta, y+l\Delta) + n_o(i, j) \right|^2 dx dy + n_e(i, j) \quad (3.1)$$

ここで I はイメージセンサの出力, Δ は SLM のピクセルサイズ, β は SLM ピクセルのフィルファクター, d は SLM の表示画像, h は光学系のインパルス応答, n_o と n_e はそれぞれ光学的, 電氣的ノイズである. また (i, j) はイメージセンサの座標で, サイズは $M \times N$ とする. (3.1) が二乗の項を含むため, HDS の記録再生チャンネルは非線形な特性を示す. 光学系のノイズがない場合, 式(3.1)は次のように表せる.

$$I(i, j) = \sum_{k, l, m, n=-L}^L d(i-k, j-l)d(i-m, j-n)G(k, m)G(l, n) + n_e(i, j) \quad (3.2)$$

L はピクセル間干渉の及ぶ範囲, G は次の式で与えられる通信路行列である.

$$G(k, m) = w^2 \Delta \int_{-\beta/2}^{\beta/2} \left[\int_{u+k-\alpha/2}^{u+k+\alpha/2} \text{sinc}(wu') du' \right] \left[\int_{u+m-\alpha/2}^{u+m+\alpha/2} \text{sinc}(wu'') du'' \right] du \quad (3.3)$$

ここで w は W を空間フィルタのサイズ, λ を波長, f をレンズの焦点距離としてとして, $w = WA/\lambda f$ で表される. (3.1)において, 光学的ノイズが二乗演算に含まれるため, 離散的通信路を求めることは難しい. そこで G を次のように近似する.

$$G(k, m) \approx \lambda_{\max} v_k v_m \quad (3.4)$$

ここで λ_{\max} と v_k はそれぞれ G の最大固有値と, それに対応する固有ベクトルの k 番目の成分である. (3.4)を(3.2)に代入することで, 光学的ノイズがない場合の記録再生チャネルのモデルが求まる.

$$I(i, j) \approx |d(i, j) \otimes h(i, j)|^2 + n_e(i, j) \quad (3.5)$$

ここで \otimes は畳み込み演算子, $h(i, j) = \lambda_{\max} v_i v_j$ である. (3.5)に光学的ノイズを加えたモデルは次のようになる.

$$I(i, j) \approx |d(i, j) \otimes h(i, j) + n_o(i, j)|^2 + n_e(i, j) \quad (3.6)$$

3.2 信号処理のフロー

前節で示したように, HDS の記録再生チャネルは非線形性を有するため, それに応じた信号処理が必要となる. 図 3.2 にホログラフィックデータストレージにおける記録・再生処理のフローチャートを示す. 信号処理は記録系と再生系に分けて考えることができる.

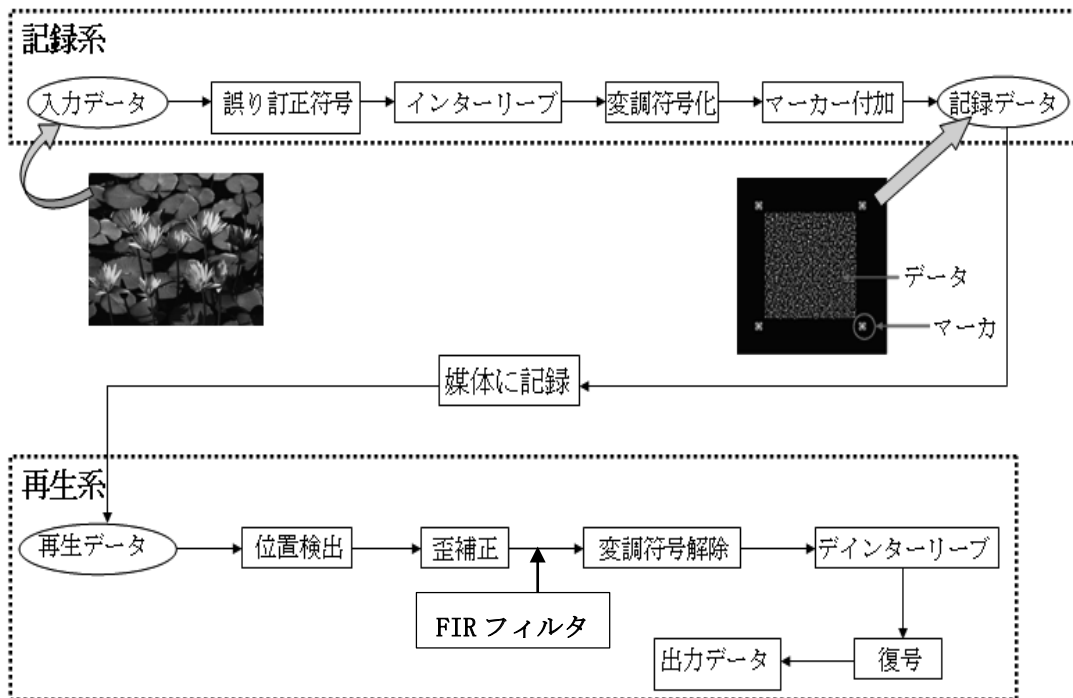


図 3.2 ホログラフィックデータストレージにおける記録再生処理のフロー

記録系は元のデータを媒体に 2 次元画像データとして記録するまでの過程を表し、再生系は再生して得られたデータを用いて出力データとするまでの過程を表している。まず、入力データに対して誤り訂正符号(ECC)による符号化を行う。次にその符号化したデータをインターリーブし、データを空間的に分散させる。インターリーブを行うことで、狭い領域に集中的に発生するエラー（バーストエラー）への耐性が高くなる。インターリーブしたデータを変調符号化することで 2 次元データ画像となり、この画像にマーカを付加することで図 3.2 に示すような記録データとなる。再生系では、再生して得られたデータに対してマーカからデータの位置検出を行う。検出されたデータに対して歪補正を行う。本研究では検出および歪補正されたデータに対して、FIR フィルタ処理及び 2 次元データの輝度補正を施し信号品質改善を図っている。その後変調符号を解除する。このデータをデインターリーブすることで分散させたデータを元の位置に戻して、最後に ECC の復号を行って出力データとなる。

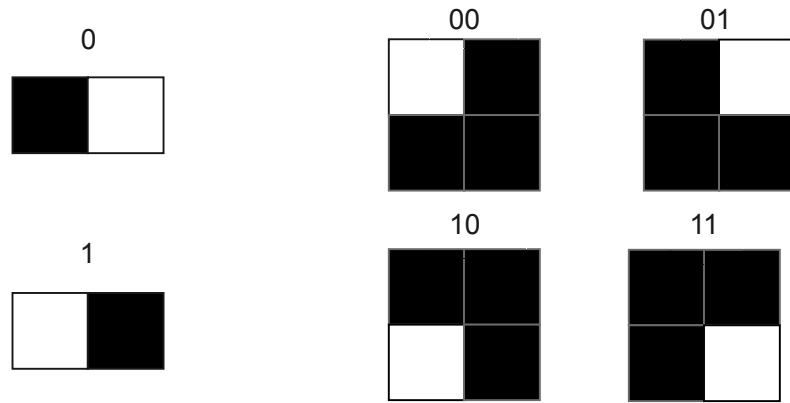
3.3 ページデータの生成

3.3.1 変調符号による冗長性の付与

ホログラフィックデータストレージでは、情報のパターンを 2 次元の黒 (OFF ピクセル) と白 (ON ピクセル) の画像で表しているが、記録・再生時における

媒体収縮や光学的ノイズなどにより、再生画像が劣化し、ON と OFF の判別ができなくなり、元のデジタル情報に復元することが困難となる。その問題を解決する 1 つとして、変調符号がある。変調符号とは、情報を伝送路に適した形式に変換する技術である。ホログラフィックデータストレージの場合、変調符号は元のデータをどのような画像として構成するかを表すルールとなる。変調符号はブロック単位で構成され、その中に ON ピクセル（白）と OFF ピクセル（黒）を設定する。このとき、ON ピクセルの数を一定にするように符号を構成することで（重み符号）、ブロック内の輝度の差で ON ピクセルか OFF ピクセルかを判断でき、画像データの輝度ムラへの耐性が高くなる。また、ON ピクセルが連続して存在する場合、周りの輝度に影響を与えるという符号間干渉が発生するが、変調符号により ON ピクセルの数を抑えることで、干渉を抑制することができる。さらに ON ピクセルがデータページに多く存在するとビットパターンが明るくなり、そのパターンを記録したホログラムの回折効率も大きくなるため、媒体飽和が発生しやすくなる。この点においてもホログラフィックデータストレージでは変調符号が有効な手法であると言える。

図 3.3 に HDS の変調符号を示す。図 3.3(a)に示した差分符号は 1 ビットを 2 ピクセルで表し、2/4 変調は 2 ビットを 4 ピクセルで表す符号方式である[1]。図中のブロック符号の上に記している値は元のビットである。差分符号と 2/4 変調符号はいずれも元のビットパターンの 2 倍のビットサイズで表しているので、符号化効率はいずれも 0.5 である。図 3.3(b)に本研究で用いた 10/16 符号と 12/16 符号を示す。10/16 符号は 10 ビットを 16 ビットで表し、12/16 符号は 12 ビットを 16 ビットで表す符号方式である。10/16, 12/16 符号はそれぞれ 4-16, 5-16 符号とも呼ばれる。これは、10/16 符号なら 4×4 の中に ON ピクセルが 4 つあるので組み合わせとしては ${}_{16}C_4 = 1820$ 通りあり、10 bit のデータを変調可能なためである。このとき、ON ピクセルが 3 つ以上並ぶことを禁止するなどの条件があり、実際に表せる組み合わせは 1820 通りより少なくなる。12/16 変調符号についても同様である。



(a) 差分符号, 2/4 変調符号



(b) 10/16 符号, 12/16 符号

図 3.3 HDS で用いる変調符号

3.3.2 ランレングス制限符号を用いた変調方式

ホログラフィックデータストレージでは記録する情報を 2 次元のページデータに変調し, そのフーリエ変換パターンをフォトポリマーなどの記録媒体にホログラムとして記録する. このとき, フーリエ変換パターンをいかに小さくできるかが, 高記録密度を実現する上で重要である. フーリエ変換パターンのサイズを決定する要因としては, 記録に用いるレーザーの波長, フーリエ変換レンズの開口数(NA), SLM のピクセルサイズが挙げられる. また, フーリエ変換光学系の特徴として, ページデータの高調波成分が少ないほど, フーリエ変換パターンは小さくなる.

RLL 変調符号は HDD や光ディスクなどのストレージで広く使われている変調符号であり, 繰り返しビットの長さを, 最小値 (最小ランレングス) と最大値 (最大ランレングス) を設けて制限することで, 同期信号の安定化と再生信号の振幅を確保できる[2, 3]. この RLL 変調符号をホログラフィックデータストレージに適用して, ページデータに繰り返しビットを設定することで, 見かけ上

のピクセルサイズを大きくすることができる。ピクセルサイズが大きくなるとフーリエ変換パターンは小さくなるため、ホログラムサイズの縮小により高密度化が期待できる[4, 5].

SLM のピクセルは通常、長方形なので、フーリエ変換パターンの強度分布 I は I_0 を定数として

$$I(x, y) = I_0 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\Delta x}{\lambda f}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\Delta y}{\lambda f}\right), \quad (3.7)$$

と表すことができる。ここで λ は波長, f はレンズの焦点距離, Δ は SLM のピクセルサイズ, $\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ である。強度分布のゼロ点間の距離は x, y 方向にそれぞれ

$$D = 2 \frac{\lambda f}{\Delta}, \quad (3.8)$$

となる。(3.8)から、フーリエ変換パターンのサイズは焦点距離と波長に比例し、SLM のピクセルサイズに逆比例することが分かる。RLL 変調符号を用いてページデータに繰り返しビットを設定することで、見かけ上のピクセルサイズを大きくし、フーリエ変換パターンを縮小することができる。

本研究では1次元のRLL変調符号を取り上げ、その性能を評価する。SLMの各ピクセルに表示されるビット(ONまたはOFF)が x 方向に最小で $d+1$ 回、最大で $k+1$ 回繰り返される時、RLL(d, k)変調符号と表記することとする。本研究では最大ランレングスを設けないRLL(d, x)変調符号を扱う。次の図3.4に例として無変調のページデータと符号長8のRLL(1, x)変調符号で変調したページデータ、およびそれらのフーリエ変換パターンを示す。図3.4(d)に示すように、RLL変調符号を用いることで、ホログラムサイズを抑制し、記録密度の向上が期待できる。RLL変調符号を用いることでフーリエ変換パターンが小さくなる事が分かる。

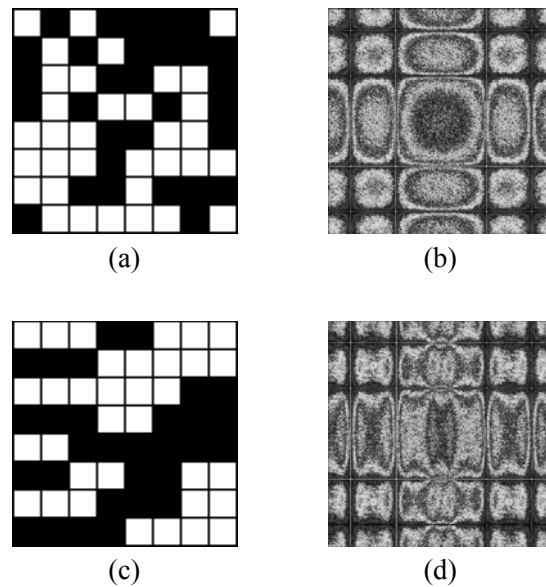


図 3.4 ページデータとそのフーリエ変換パターンの例
 (a) 無変調ページデータ. (b) 無変調ページデータのフーリエ変換パターン.
 (c) RLL(1, x)変調符号. (d) RLL(1, x)変調符号のフーリエ変換パターン.

3.3.3 光学的オーバーサンプリング

本研究で行った実験では、記録する前の元のデータに対し、等倍でサンプリングするよりもさらに詳細なサンプリングをすることでより詳細な信号の評価を行うために光学的オーバーサンプリングをかけて再生している。これは再生像の1ビットをCCD上で 2×2 ピクセルに拡大させて、画像歪に対する許容度を得た上で信号処理を行う方法である。オーバーサンプリングを行った信号を評価する場合は、図 3.5 に示したようにダウンサンプリングする。この操作により、ホログラム面上で十分細かなサンプリング点数を確保すると同時に、より詳細な信号を評価することが可能となる。

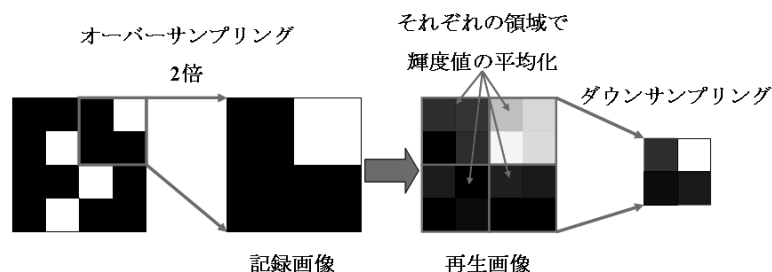


図 3.5 オーバーサンプリングとダウンサンプリング

3.4 再生信号の位置検出

ホログラフィックデータストレージでは，記録データ中に埋め込まれた位置検出マーカークの位置座標を検出するために，画像相関法を用いる．画像相関法は2つの輝度関数 $f(x, y)$, $g(x, y)$ を用いて，画像上における特定パターンの変位を解析する方法である．一般的には画像を検査領域と呼ばれる小領域に分割し，その分割された領域内の輝度値パターンを用いて，領域内の平均移動量を算出する方法である．すなわち図3.6のように2画像間でパターンの類似している領域を検査することになるが，その類似度を相関関数などによって評価するため，一般に画像相関法と呼ばれる．本研究では高速演算の可能なFFT相互相関法を用いた[6]．図3.7に検出するための目印の元画像となるテンプレート画像（位置検出マーカーク）を，図3.8に検出目標を含んだ画像である入力画像を示す．ここで，テンプレート画像は位置検出マーカークフォーマットであり画像サイズは 9×9 ピクセル，マーカーク検出用画像は再生像の位置検出マーカーク付近を切り出した画像であり画像サイズは 60×60 ピクセルである．

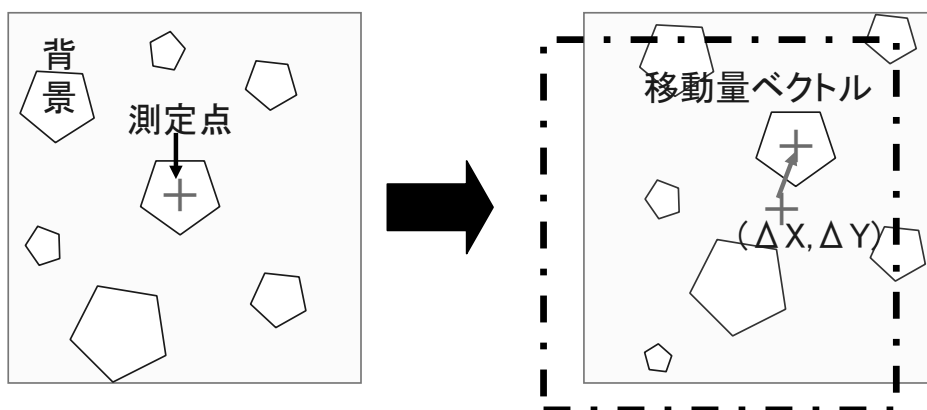


図 3.6 画像相関法



図 3.7 テンプレート画像（位置検出用マーカーク）

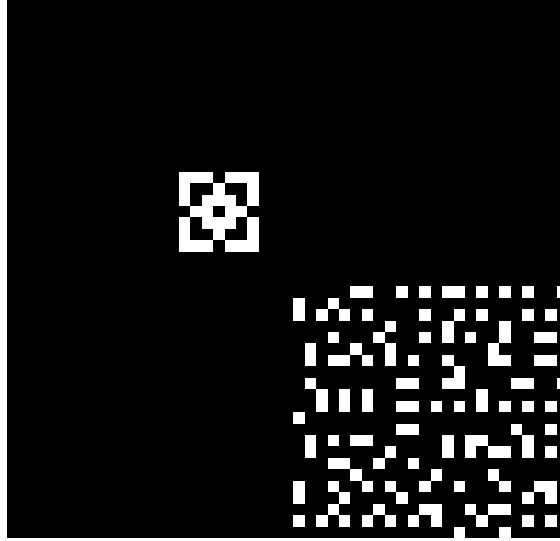


図 3.8 マーカー検出用画像

3.4.1 FFT 相互相関法による移動量ベクトルの推定

本論文では FFT 相互相関法を用いてマーカーの位置検出を行っている。フーリエ変換および逆変換の定義は式(3.3)および式(3.4)で与えられる。 f は原信号， F はそのフーリエ変換である。原信号が時系列信号であれば x ， ξ はそれぞれ時間および角周波数を表し，1 次元的な空間情報であれば空間座標と空間角周波数を表す。

$$F(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\xi x} dx \quad (3.9)$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\xi) e^{j\xi x} d\xi \quad (3.10)$$

ただし，式(3.9)左辺の積分の係数 $1/2\pi$ は式(3.10)の逆変換に付く場合や，両辺に等しく $(1/2\pi)^{1/2}$ が掛けられる場合もあるが，ある信号にフーリエ変換そして逆変換を施したとき，その結果が元の信号と一致するように全体として $1/2\pi$ が掛かっている。また，同様にもう 1 つの信号 g とそのフーリエ変換 G も定義できる。

ここで，信号 f と g の相互相関関数 C_{fg} を次のように定義する。

$$C_{fg}(\Delta x) = \overline{f(x)g(x+\Delta x)} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x)g(x+\Delta x) dx \quad (3.11)$$

式中で Δx は空間座標のずれの量であり，相互相関を取る際，信号 f, g をどの座標位置で対応付けるかを表している．式(3.5)の $g(x+\Delta x)$ をフーリエ逆変換

$$g(x+\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi) e^{j\xi(x+\Delta x)} d\xi \quad (3.12)$$

で表し，積分を整理すると次のようになる．

$$\begin{aligned} C_{fg}(\Delta x) &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi) e^{j\xi(x+\Delta x)} d\xi \right\} dx \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \left[\int_{-\infty}^{\infty} G(\xi) e^{j\xi\Delta x} \left\{ \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x) e^{j\xi x} dx \right\} d\xi \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

$f(x)$ は積分範囲 $[-L/2, L/2]$ 以外では 0 であると仮定すると積分範囲の置き換えができ， $f(x)$ を含む積分は式(3.9)に示すフーリエ変換の共役形式 F^* を用いて表すことができる．

$$\begin{aligned} C_{fg}(\Delta x) &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \left[\int_{-\infty}^{\infty} G(\xi) e^{j\xi\Delta x} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{j\xi x} dx \right\} d\xi \right] \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi F^*(\xi) G(\xi) e^{j\xi\Delta x} d\xi \right\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{2\pi}{L} F^*(\xi) G(\xi) e^{j\xi\Delta x} \right\} d\xi \end{aligned} \quad (3.14)$$

一方，相互相関関数 C_{fg} はクロススペクトル S_{fg} 逆フーリエ変換として次のように定義される．

$$C_{fg}(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\xi) e^{j\xi\Delta x} d\xi \quad (3.9)$$

式(3.8)と式(3.9)を比較すると，クロススペクトル S_{fg} は

$$S_{fg}(\xi) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{2\pi}{L} F^*(\xi) G(\xi) e^{j\xi\Delta x} \quad (3.10)$$

として得られる。

3.4.2 FFT 相互相関法による位置検出処理

FFT 相互相関による位置検出では，まず再生信号のマーカ付近の領域を切り出し，切り出したそれぞれの領域に FFT 相互相関法を用いてマーカの位置検出を行う。得られたマーカの座標を用いて画像に対して局所的な補正処理を行う。

原関数 $f(x)$, $g(x)$ のフーリエ変換を F , G と表すと，相関関数は，クロススペクトル F^*G を逆フーリエ変換して求められる。画像計測では 2 次元信号として原信号が与えられるだけで 1 次元信号と基本的な考え方は同じである。実際の処理手順を図 3.9 に示す。

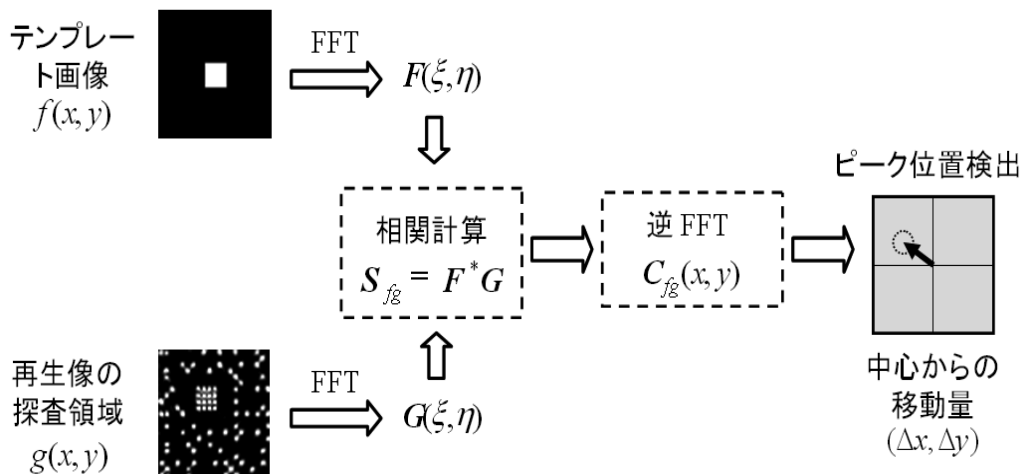


図 3.9 FFT 相互相関法の処理手順

$N \times N$ の検査領域を第一画像に，同じ大きさの候補領域を第二画像の同じ位置

に設定し、これら二つの領域の間で相関計算を行う。FFT 相互相関法では検査領域と探査領域はサイズが同じであり、画像中の位置も同一としなければならない。第一画像の検査領域および第二画像の候補領域の輝度値パターンをそれぞれ $f(x), g(x)$ とし、クロススペクトル

$$S_{fg}(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^* \{f(x)\} \mathfrak{F} \{g(x)\} \quad (3.11)$$

を求め、これに逆フーリエ変換を施すことにより、次のように $f(x), g(x)$ 間の相互相関関数が得られる。

$$C_{fg}(X, Y) = \mathfrak{F}^{-1} \{S_{fg}(\xi, \eta)\} \quad (3.12)$$

ただし \mathfrak{F} と \mathfrak{F}^{-1} はそれぞれフーリエ変換と逆フーリエ変換を表す。相互相関関数 $C_{fg}(x, y)$ からピーク値を検出することで移動量ベクトル $(\Delta x, \Delta y)$ を求めることができる。

測定精度に影響を与えるパラメータには検査領域サイズ、平均移動量などがあるが、解析アルゴリズム上のパラメータは検査領域サイズ N だけであり、非常に簡便である。また、探査領域を局所的に設定するので、画像サイズが大きい場合では、画像全体でマーカのマッチングをするより高速で検出を行うことができる。検査領域サイズの設定については、FFT 相互相関法のアルゴリズムの関係から $N = 2^n$ と設定するので、 $N = 16, 32, 64$ を取ることが多い。図 3.10 は実験画像のマーカ画像に対して相互相関法を行ったときの相関値のグラフである。このグラフでは、ピーク値が中心に位置していないことから、マーカが本来の位置からずれていることが分かる。

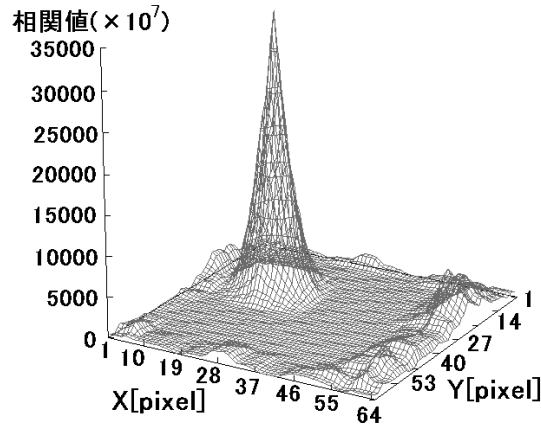


図 3.10 FFT 相互相関法によるマーカの相関値

3.5 アフィン変換による画像歪み補正

ホログラムの再生像は回転・縮小拡大などの歪が生じることが多い。図 3.11 は誤り訂正符号に畳み込み符号, 変調符号に 2/4 変調符号を用いたデータ画像である。このように歪んだ画像に対しては補正を行う必要がある。データ画像に対して回転や拡大縮小補正を行う方法としてアフィン変換を用いる。アフィン変換とは, 画像を平行移動, 回転, 縦方向・横方向でそれぞれ拡大縮小を施す変換である[7]。補正前の座標を (x, y) , 補正後の座標を (x', y') とすると, それぞれの座標成分の関係式は次のようになる。

$$\begin{cases} x' = a_1x + b_1y + d_1 \\ y' = a_2x + b_2y + d_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

上の式は次式のように表現できる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

式中の $\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix}$ は回転と変形を処理し, $\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$ は平行移動の成分を表す。補正を

行う際には 4 隅に配置したマーカを FFT 相互相関法により位置検出をし, その座標とマーカ間の距離から回転角度, 拡大縮小率を 4 つそれぞれのマーカ

一間で計算し，その平均値を求めて補正する．

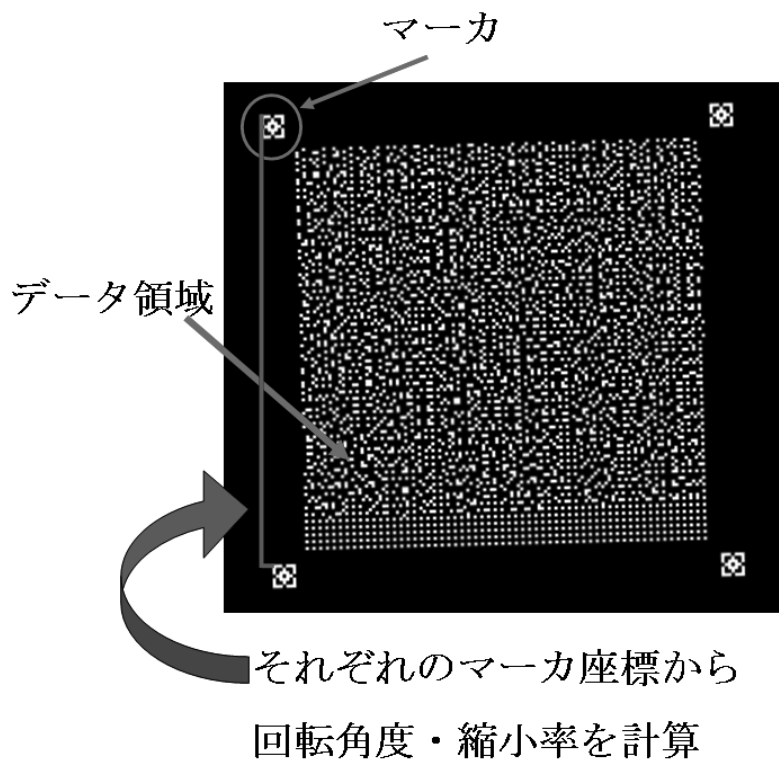


図 3.11 データ画像に対するアフィン変換

3.6 2次元 FIR フィルタ処理

信号処理におけるフィルタとは，信号に含まれる周波数成分のうち必要とされる周波数成分をそのままにして，不必要な成分をできるだけ除去する機能をもったシステムである．ホログラフィックデータストレージにおいてもフィルタ処理は重要な役割を占めており，劣化した画像に対してフィルタをかけることで信号の品質を高めることができる．

本研究では FIR (finite impulse response) フィルタを用いて再生信号の等化処理を行う．FIR フィルタは，多くの場合，式(3.15)のような非再帰型の差分方程式で実現される[8]．

$$y_k = a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + \dots + a_n x_{k-n} \quad (3.15)$$

\mathbf{x} と \mathbf{y} はそれぞれフィルタの入力と出力，重み \mathbf{a} が FIR フィルタの係数である．この係数をタップ係数と呼ぶこともある．特に断らない限り， a_i は実数である

ものとする。また、式(3.15)において、 n をフィルタの次数、 $n+1$ をフィルタ長と呼ぶ。

今回検討する FIR フィルタは 2 次元のフィルタで、イメージセンサの出力信号と畳み込み演算することによって実現する[9, 10]。その概略図を図 3.12 に示す。

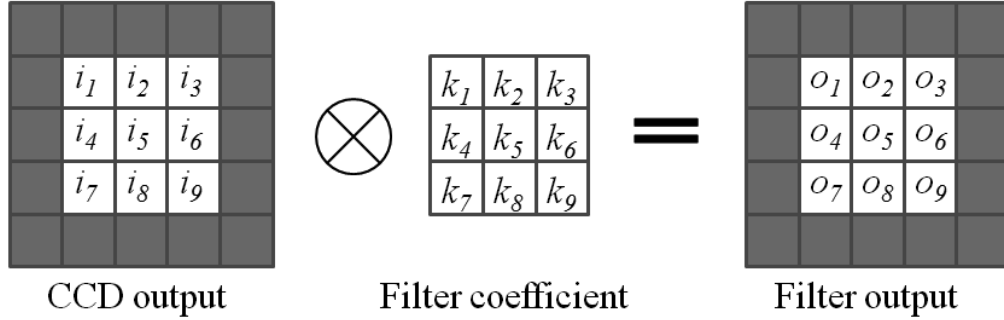


図 3.12 ホログラフィックデータストレージに対する FIR フィルタの適用

3.6.1 LMMSE によるフィルタ係数の設計

LMMSE (linear minimum mean squared error)は次で定義される誤差の 2 乗平均誤差を最小にするフィルタ係数の設計手法である[11, 12]。式(3.16)の右辺第 2 項がフィルタの出力にあたる。

$$e(i, j) = d(i, j) - \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n w(p, q)u(i-p, j-q) \quad (3.16)$$

ここで $d(i, j)$ および $u(i, j)$ は入力信号とイメージセンサにより得られた出力信号である。誤差信号 $e(i, j)$ の 2 乗平均誤差 J は、

$$\begin{aligned} J &= E[e^2(i, j)] \\ &= E[d^2(i, j)] - 2 \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n w(p, q)P(p, q) \\ &\quad + \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n \sum_{r=-m}^m \sum_{s=-n}^n w(p, q)w(r, s)R(r-p, s-q) \end{aligned} \quad (3.17)$$

である。 E は期待値であり、 P, R は

$$P(p, q) = E[d(i, j)u(i-p, j-q)] \quad (3.18)$$

$$R(r-p, s-q) = E[u(i-p, j-1)u(i-r, j-s)] \quad (3.19)$$

で表される入力信号と出力信号の相互相関関数，自己相関関数である．この2乗平均誤差 J を最小にするのは J の \mathbf{w} に関する導関数が0となるときであり，

$$w(r,s) = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{\mathfrak{I}[P(p,q)]}{\mathfrak{I}[R(p,q)]} \right] \quad (3.20)$$

で求まる．上式により得られる \mathbf{w} は画像のサイズと同じであるが，本研究では中心の 3×3 の範囲のみを使用した．

3.6.2 実数値遺伝的アルゴリズムによるフィルタ係数の設計

遺伝的アルゴリズム(genetic algorithms:GA)とはダーウィンの進化論に基づき，自然界の「適者生存」を応用した最適化の方法である．一般的な遺伝的アルゴリズムの処理手順は，図 3.13 のようになる．この一連の流れで優秀な個体がより多くその子孫を残すことができる．本稿では，実数値遺伝的アルゴリズム(real-coded genetic algorithms: RCGA)を FIR フィルタの係数決定で用いた．実数値遺伝的アルゴリズムとは探索に用いる個体（遺伝子型）が実数値ベクトルである GA である[13-19]．本研究では，RCGA を最適係数設計とし，LMMSE が実際にフィルタ設計最適化されているか検証するために用いた．図 3.14 のように遺伝子型を長さ9のベクトル，表現型を 3×3 の FIR フィルタ係数とし，それぞれの実数値ベクトル \mathbf{g} はそれぞれの係数 \mathbf{w} に対応させた．また，各遺伝子の値はランダムに決定した．

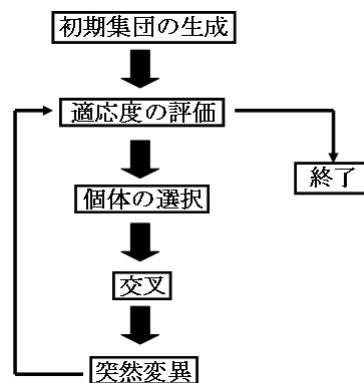


図 3.13 遺伝的アルゴリズムのフローチャート

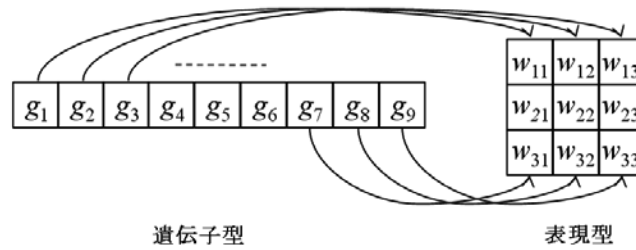


図 3.14 遺伝子型と表現型

以下に本研究で用いた RCGA を説明する．まず，初期集団をランダムに生成する．初期集団の生成を行った後に各々個体に対して適応度の評価を行う．適応度は，どれだけその個体が優れているかを示したもので，値が大きいほど子孫を残す確率が高くなる．遺伝的アルゴリズムにおいては一般に，予め定めておいた評価関数と呼ばれる関数を用いて，個体ごとに算出する．ここでは次式で表すような BER に基づいた値を適応度にし，BER が低いほど適応度が高くなるように最適化を行う．

$$f = -\log(\text{BER}) \quad (3.21)$$

各個体の適応度が決定されたら，次に個体の選択を行う．この時基本的には，適応度の高い個体がより多くの子孫を残すようにする．今回適用した選択方式は，ルーレット選択である．ルーレット選択とは適応度に基づいてそれぞれの個体の選択される確率の大きさを決定し，その上で親になる個体をランダムに選択する方式である．図 3.15 に示すように適応度の高い個体ほど選択される確率が高くなる．

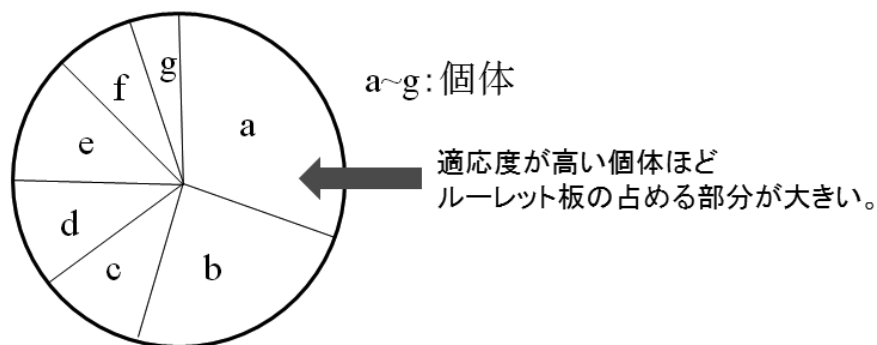


図 3.15 ルーレット選択

個体対が決定されたら，遺伝情報の交叉を行う．交叉とは，選択によって選

出された個体に対して、ある交叉位置で双方の遺伝情報の一部ずつをピックアップし、子孫の遺伝情報を構築する。ここで用いた交叉はブレンド交叉(blend crossover: BLX- α)である[14]。BLX- α はRCGAにおける交叉操作の1つである。まず、親個体の実数ベクトルの各変数の区間 d を両側に αd だけ拡張した区間から一様乱数に従ってランダムに子個体を生成する。すなわち、親個体から両側に αd だけ拡張した区間が子個体の生成領域となる。図 3.16 に 1 次元での BLX- α による子個体生成の例を示す。BLX- α では、親個体が離れて存在している場合には子個体も広い範囲に生成され、親個体が互いに近くに存在している場合には親個体の近傍付近に生成される特徴がある。

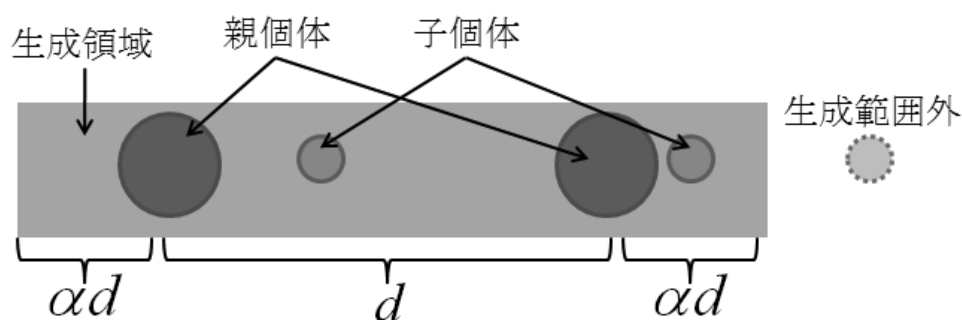


図 3.16 ブレンド交叉

ここで、世代を重ねていくときに交叉をすることで適応の悪い個体が生成される可能性があるため、最も適応度の高い個体をそのまま次世代にコピーするエリート保存を用いた。交叉を終えた後、突然変異の操作を行う。突然変異は、ある確率で遺伝情報の一部の値を変異させる操作である。交叉だけでは、親となる個体の遺伝情報がすべてとなってしまう、限られた範囲の子孫しか生成できない。これに対し遺伝情報のある部分を一定の確率で図 3.17 のように変異させる突然変異を付加することによって、集団の多様性を保持することが出来る。突然変異を行ったら再び適応度の評価に戻って処理を行う。以上の操作を、繰り返すことで優秀な遺伝情報を持った個体が選定される。

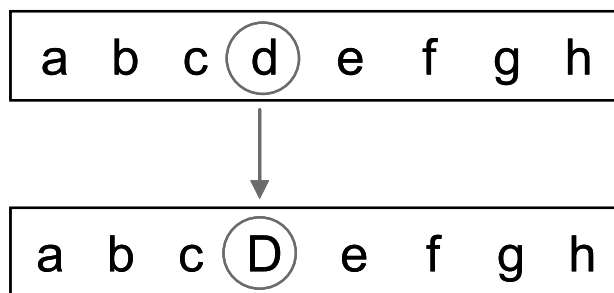


図 3.17 突然変異

3.6.3 QMMSE によるフィルタ係数の設計

QMMSE (quadratic minimum mean squared error)は次に示す誤差 e の 2 乗平均誤差を最小にするフィルタ係数の設計手法である[20].

$$\begin{aligned} e(i, j) &= d(i, j) - y(i, j) \\ y(i, j) &= \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n w_1(p, q)u(i-p, j-q) + w_2(0, 0)u^2(i, j) \end{aligned} \quad (3.21)$$

ここで $y(i, j)$ はフィルタの出力である. LMMSE を比較すると, 2 字の非線形項が加わっていることが特徴である. イメージセンサの出力信号 \mathbf{u} は

$$\mathbf{u} = [u(i+m, j+n), \dots, u(i-m, j-n)]^T = [\mathbf{u}_1^T, u^2(i, j)]^T \quad (3.22)$$

と表せる. この方法ではフィルタ係数 \mathbf{w} は

$$\mathbf{w} = [w_1(-m, -n), \dots, w_1(m, n), w_2(0, 0)]^T \quad (3.23)$$

と表され, 入力信号と出力信号の自己相関関数 P と相互相関関数 R によって求められる.

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= E[\mathbf{u}d^2(i, j)] = [\mathbf{p}_1^T, p_2]^T, \quad \mathbf{p}_1 = E[\mathbf{u}_1d^2(i, j)], \\ p_2 &= E[u^2(i, j)d^2(i, j)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E[\mathbf{u}\mathbf{u}^T] = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{r} \\ \mathbf{r}^T & r_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_1 = E[\mathbf{u}_1\mathbf{u}_1^T], \\ \mathbf{r} &= E[\mathbf{u}_1u^2(i, j)], \quad r_0 = E[u^4(i, j)] \end{aligned} \quad (3.25)$$

フィルタ係数を求めるためにはフィルタ係数 \mathbf{w} に関する平均 2 乗誤差が費用関数の傾きが 0 になるように解くことで最適な係数として \mathbf{w} が得られる.

$$\begin{aligned} E[e_0(i, j)\mathbf{u}] &= \mathbf{p} - \mathbf{R}\mathbf{w} \\ \mathbf{w} &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \end{aligned} \quad (3.26)$$

\mathbf{w} を用いて CCD 出力に FIR フィルタを適用するときの式は (3.27) のように表され

る. $y(i, j)$ はフィルタ適用後の画像である.

$$y(i, j) = \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m w(p, q)u(i-p, j-q) + w(0,0)u^2(i, j) \quad (3.27)$$

3.6.4 Volterra Equalizer によるフィルタ係数の設計

Volterra equalizer のフィルタ出力は以下のように表される[11].

$$\begin{aligned} y(i, j) = & w_0 + \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n w_1(p, q)u(i-p, j-q) \\ & + \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n \sum_{r=-m}^m \sum_{s=-n}^n w_2(p, q, r, s)u(i-p, j-q)u(i-r, j-s) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Volterra equalizer は QMMSE による設計のときは1つしかなかった2乗の項をさらに増やしたものと考えられ, QMMSE のときよりも出力する周りのピクセルに対しての非線形な特性に対応することができる. 右辺の第1項目は定数である. 右辺第2項目は線形フィルタである. 線形フィルタの係数 \mathbf{w}_1 は $(2m+1) \times (2n+1)$ の2次元である. 右辺第3項目は非線形フィルタであり, この項は $(2m+1)^2 \times (2n+1)^2$ のサイズの4次元となる. これらのフィルタ係数は LMS アルゴリズムによって以下のように求められる. 本研究では $m=1, n=1$ であるのでそれぞれ \mathbf{w}_1 のフィルタサイズは 3×3 , \mathbf{w}_2 のフィルタサイズは $3 \times 3 \times 3 \times 3$ である.

$$\begin{aligned} w_0^{k+1} &= w_0^k + \alpha e^k \\ \mathbf{w}_1^{k+1} &= \mathbf{w}_1^k + \beta e^k \mathbf{Y} \\ \mathbf{w}_2^{k+1} &= \mathbf{w}_2^k + \gamma e^k \mathbf{U} \end{aligned} \quad (3.29)$$

α, β, γ はそれぞれステップサイズという定数でこの値が大きければ大きいほど最適な係数値により早く収束する. 逆にステップサイズが小さいとより正確に収束していくが収束速度は遅い. そのため適当な値を選択する必要がある. \mathbf{Y} は \mathbf{y} にもとづいたベクトルであり, \mathbf{U} は $u(i-p, j-q) u(i-r, j-s)$ によって求められるベクトルである. k は反復回数であり, 反復回数を増やせば最適化に時間がかかるがより効果の高いフィルタ係数が得られることになる. e は誤差信号であり, 式のように入力信号とフィルタ出力の差によって求められる.

$$e = \sum_{i,j} [d(i,j) - u(i,j)] \quad (3.30)$$

この誤差信号が小さくなるようにフィルタ係数を設計する。

3.7 自動利得制御による光強度分布むらの補正

ホログラフィックデータストレージでは、記録媒体であるフォトポリマーへのレーザー光照射後、媒体収縮で再生画像に歪みが生じ、信号品質を悪化させる。これらの要因による影響として再生画像に偏った輝度値のムラ、あるいは各ビットの強度分布に変化が生じる。そこで多重記録時の再生画像に対して自動利得制御(AGC: auto gain control)を行った。再生信号レベルは、各ピクセルの輝度値であるので、本研究では再生画像の輝度値の補正が AGC に該当する。

輝度値補正法の具体的な手法は、データ画像をいくつかの領域に切り分け、それぞれのサブページとして設定し、サブページ内の輝度値の平均値を用いて補正割合を決定し、画像の輝度値を補正する。具体的な手順はデータ領域全体の輝度平均値 μ とサブページ内の平均値 μ_i から補正割合 γ_i を次式から算出し、それぞれのサブページ内全体の輝度値に補正割合 γ_i を乗じた。

$$\gamma_i = \frac{\mu}{\mu_i} \quad (3.31)$$

図 3.18 に AGC による輝度値補正前後の画像を示す。ページデータは 10/16 変調符号で変調している。AGC により輝度ムラが改善していることが分かる。本研究では再生信号の輝度値の閾値と平均値の 2 パターンで処理し、それぞれの画像品質の評価を行う。

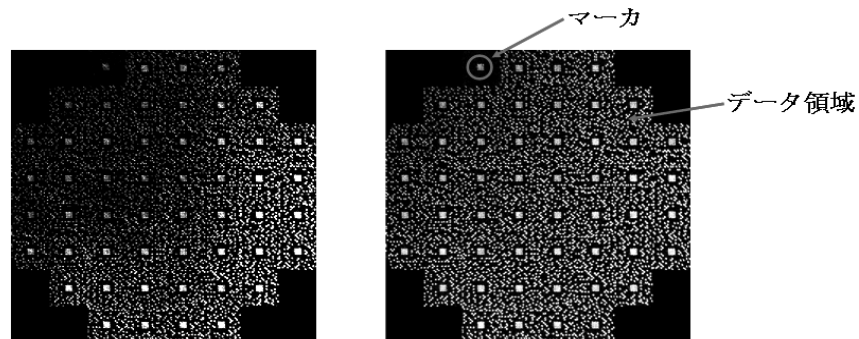


図 3.18 輝度値補正に用いた再生画像

3.8 再生信号の品質評価方法

再生信号の評価として SNR (signal to noise ratio), PSNR (peak-signal to noise ratio), BER (bit error rate)を用いる. まず SNR における信号を評価する関数として次式を示す[21].

$$\text{SNR} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}} \quad (3.32)$$

ここで, μ は輝度値の平均, σ^2 は輝度値の分散を表しており, 添字の 0 と 1 は, 0 が OFF ビット (黒), 1 が ON ビット (白) を表している.

次に PSNR の定義を示す.

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{(\text{signal}_{\max})^2}{\frac{1}{M} \sum_0^M (\text{input} - \text{output})^2} \quad (3.33)$$

ここで, signal_{\max} は信号の最大値 (8 bit グレースケール画像においては 255), M は信号の総数を表す. PSNR とは元画像と対象とする画像の比較に用いられ, この値が低いほどノイズが多いことを意味する. 逆にノイズの混入が全く無ければその値は ∞ となる.

BER はエラーの個数と全体のビット数の比である. error の判定には上位選択と閾値選定の 2 通りがある. 上位選択は, n - m 符号における大きさ $m \times m$ ビットの区画内で, 輝度値の上位 n 個のピクセルを 1 とする方法である. この方法は無変調符号の評価には使用できない. 閾値選定は, 2 値化閾値を決定する問題を 2 クラス分離問題の考え方で閾値を求める. この概念を以下の図 3.19 に示す.

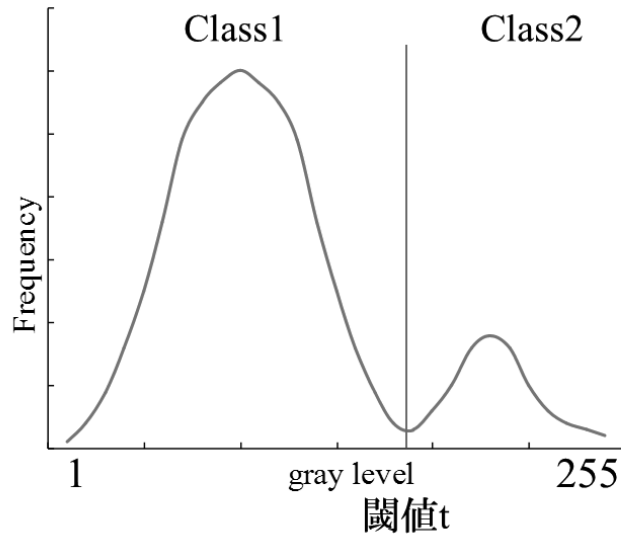


図 3.19 閾値選定の概念

2 値化の方法としては大津の方法が挙げられる[22]. 輝度値 k において, $S_1 = \{0, \dots, k\}$, $S_2 = \{k+1, \dots, 255\}$ に属する画素を 2 クラス C_0, C_1 に分類して考える. 各クラスの生起確率を ω_1, ω_2 , 平均輝度値を μ_1, μ_2 とし, 輝度値 k までの累積量を $\omega(k), \mu(k)$ すると,

$$\omega_1 = \sum_{i=0}^k p(i) \equiv \omega(k), \quad \omega_2 = \sum_{i=k+1}^{255} p(i) \equiv 1 - \omega(k) \quad (3.34)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^k \frac{ip(i)}{\omega_1} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)}, \quad \mu_2 = \sum_{i=k+1}^{255} \frac{ip(i)}{\omega_2} = \frac{\mu - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (3.35)$$

ここで, μ は全平均輝度値であり,

$$\mu = \sum_{i=0}^{255} ip(i) = \omega_1 \mu_1 + \omega_2 \mu_2 \quad (3.36)$$

$$\mu(k) = \sum_{i=0}^k ip(i) \quad (3.37)$$

となる. よって二つのクラス間分散 $\sigma^2(k)$ は,

$$\begin{aligned}
\sigma^2(k) &= \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu)^2 \\
&= \omega_1\omega_2(\mu_2 - \mu_1)^2 \\
&= \frac{[\mu\omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

と表される．この $\sigma^2(k)$ が最大となるような k を閾値として決定する．

3.9 結言

本章ではホログラフィックデータストレージにおける信号処理法について説明した．ホログラフィックデータストレージで使用するデータは 2 次元のパターンであるため，記録・再生時の品質劣化および歪みは再生エラーの原因となる．ここでは，エラー対策として本研究で適用した，変調符号・ランレングス制限符号・オーバーサンプリング法・FIR フィルタ設計手法・自動利得制御について述べ，また位置検出・歪み補正処理として FFT 相互相関法・アフィン変換の説明をした．最後に再生信号の評価指標である SNR/BER について説明した．

参考文献

- [1] K. Nishimoto, F. Naito, M. Yamamoto, "Soft-Decision Viterbi Decoding for 2/4 Modulation Code in Holographic Memory," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 4102-4106 (2006).
- [2] B. H. Marcus, P. H. Siegel, and J. K. Wolf, "Finite-state modulation codes for data storage," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **10**, 5-37, (1992).
- [3] O. Malki, J. Knittel, F. Przygodda, H. Trautner, and H. Richter, "Two-Dimensional Modulation for Holographic Data Storage Systems," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5993-5996 (2008).
- [4] Y. Nakamura, K. Shimada, T. Ishii, H. Ishihara, M. Hosaka, and T. Hoshizawa, "High-Density Recording Method with RLL Coding for Holographic Memory System," in *Nonlinear Optics, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2011), paper OMB5.
- [5] S. Yoshida, Y. Takahata, S. Horiuchi, M. Yamamoto, "Spatial run-length limited code for reduction of hologram size in holographic data storage," *Opt. Commun.* **358**, 103-107 (2016).
- [6] 可視化情報学会, 「PIV ハンドブック」, (森北出版, 東京, 2002)
- [7] 平岡和幸, 堀玄, 「プログラミングのための線形代数」, (オーム社, 東京, 2004)
- [8] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Nawab: *Signals and Systems*, 2nd ed. (Prentice Hall, New Jersey, 1996).
- [9] 川又政征, 田口亮, 村岡輝雄, 「2次元信号と画像処理」(コロナ社, 東京, 1996)
- [10] 酒井幸市, 「デジタル画像処理の基礎と応用」(CQ出版社, 東京, 2003)
- [11] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, "Application of Linear and Nonlinear Equalization Methods for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1079-1083 (2006).
- [12] M. Keskinöz, B. V. K. V. Kumar, "Application of linear minimum mean-squared-error equalization for volume holographic data storage," *Appl. Opt.* **38**, 4387-4393 (1999).
- [13] L. Davis: *The Handbook of Genetic Algorithms* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1990).
- [14] L. J. Eshleman, J. D. Schaffer: "Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata," in *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol. 2, 187-202 (Morgan Kaufmann Publishers, Massachusetts, 1993).
- [15] C. Z. Jonikow, Z. Michalewicz: "An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representations in Genetic Algorithms," *Proc. Forth Int. Conf. on*

- Genetic Algorithms, 31-36 (1991).
- [16]Z. Michalewicz: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
- [17]N. J. Radcliffe, "Forma Analysis and Random Resectful Recombination," Proc. Forth Int. Conf. on Genetic Algorithms, 222-229 (1991).
- [18]H. M. Voigt, H. Muhlenbein, D. Gvetkovic, "Fuzzy Recombination for the Breeder Genetic Algorithm," Proc. 6th Int. Conf. on Genetic Algorithms, 104-111(1995).
- [19]A. Wright: *Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, Foundations of Genetic Algorithms, Vol. 1*, 205-218 (Morgan Kaufmann Publishers, Massachusetts, 1993).
- [20]A. He, G. Mathew, "Nonlinear equalization for holographic data storage systems," *Appl. Opt.* **45**, 2731-2741 (2006).
- [21]A. M. Glass, M. J. Cardillo, Hans J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox: *Holographic Data Strage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [22]N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Syst.* **9**, 62-66 (1979).

第4章 ホログラフィックデータストレージの再生信号の品質改善の検討

4.1 波面収差に対するフィルタ処理の効果

再生信号評価のために図 4.1 に示す光学系を用いて、収差の設定を行うパラメータの評価について検討した。各種収差に対する FIR フィルタの効果を検討するために、参照光の光路上に位相変化を与える空間変調器を設置して種々の収差状態を形成させ、Shack Hartmann 法に基づく波面センサ(wave front sensor: WFS)で各種収差状態を実現する詳細なパラメータの測定を行った。検討する収差は球面収差、非点収差およびコマ収差である。実験において各収差を単独で付与することは困難であるため、比較的各収差がメインとなる状態を形成し、収差の影響とフィルタの効果を測定している。

使用レーザーは波長 532 nm の緑色レーザーである。ND フィルタにより光量を調整後、液晶へ入射させる偏光面をあわせるために偏光板を設置する。画像全体に入射させるためビームエキスパンダによりビーム径を拡大する。SLM となる液晶は EPSON 製 L3P10X-6x で画素数は 1024 × 768 (XGA)、画素ピッチは 19.5 μm × 19.5 μm である。ここに、PC からの VGA 出力により画像を表示する。表示された画像にレーザーが入射することにより、データを付与することができる。液晶により偏光面が変化するため、さらに偏光板を設置する。1 組のリレーレンズを設置し WFS により収差量を測定した。

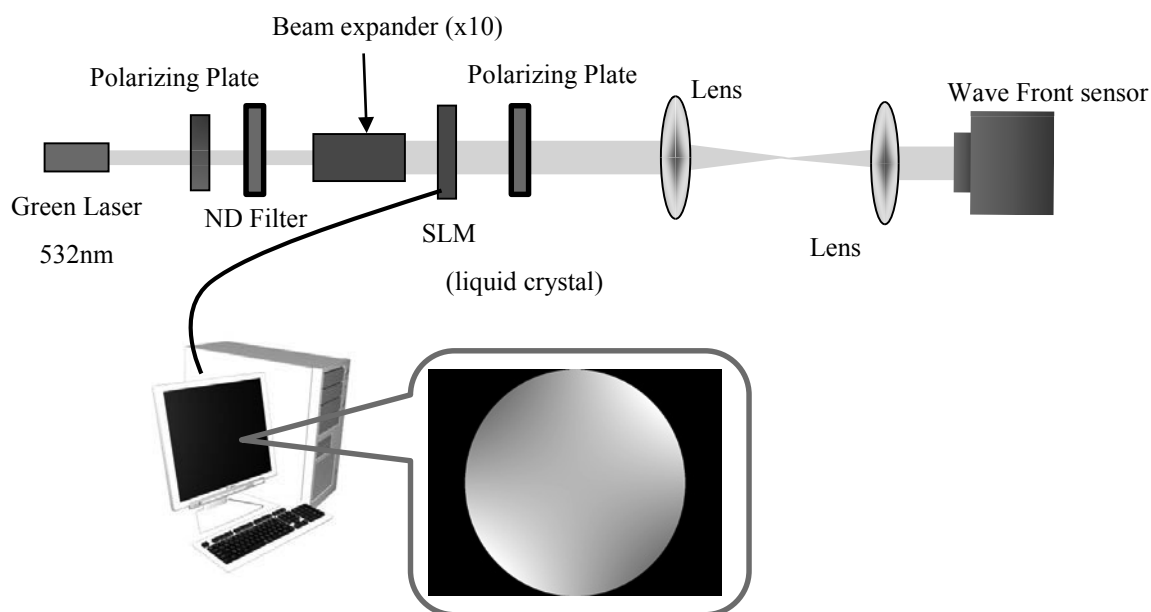


図 4.1 波面収差の影響とフィルタの効果を評価する実験系

波面収差の計測法として、最も普遍的な干渉計を用いた方法や、位相回復による方法、回折格子像を用いる方法が挙げられる。本研究では、計測原理が非常に幾何光学的に示される Shack Hartmann 法を用いて波面収差計測を行う[1]。図 4.2 にそのモデル図を示す。

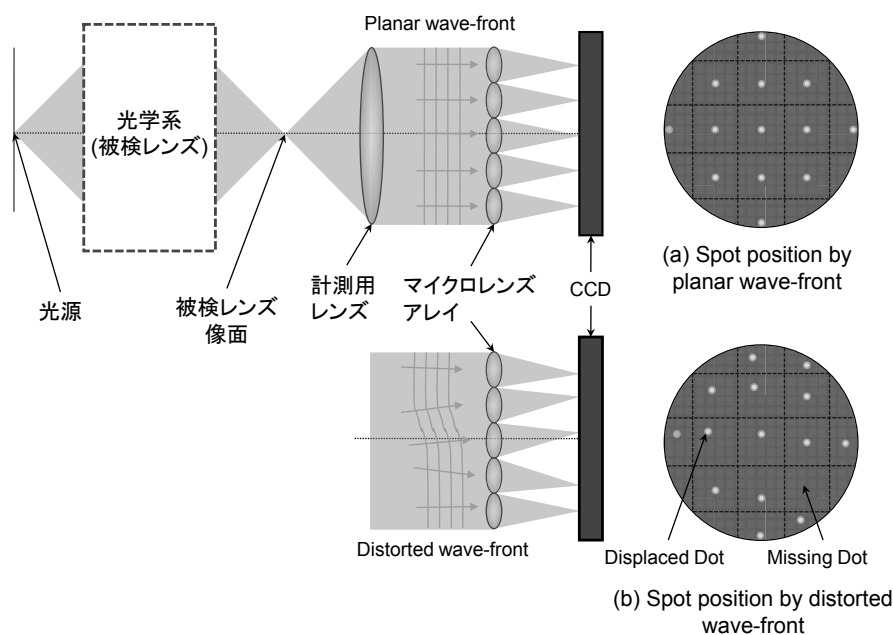
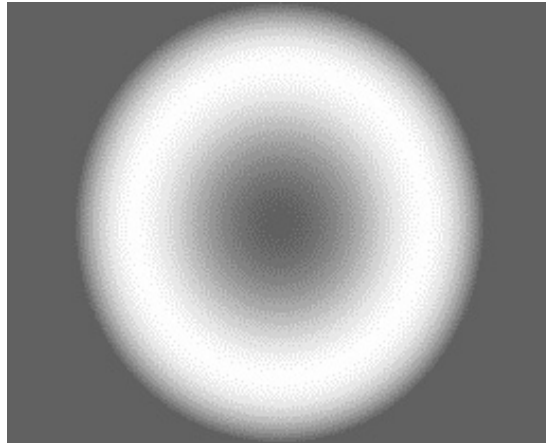


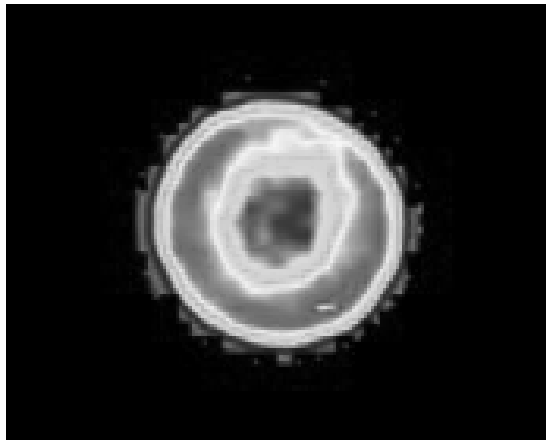
図 4.2 波面収差の測定系

この方法では、瞳を多数の部分に分割し、各部分瞳から射出された光の横収差を計測することで波面収差を求めることができる。光源から出た光は検査する光学系(レンズ等)を通過し、その像面より後に配置された計測用のレンズ、さらに、計測用レンズの瞳位置に 2 次元配列されたマイクロレンズアレイを通過する。これにより、マイクロレンズ焦点面に配置された CCD デテクタに点像を形成する。波面の入射方向がマイクロレンズ平面の法線方向、つまり理想的な波面である場合のみ、点像が各マイクロレンズの光軸上に形成される。

図 4.3 に SLM を駆動して球面収差を発生させた場合について、対応する濃淡パターンを形成した結果を示す。



(a) 使用する波面収差形状

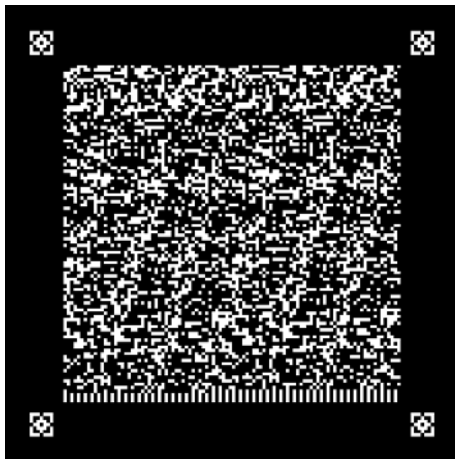


(b) 透過後の波面収差

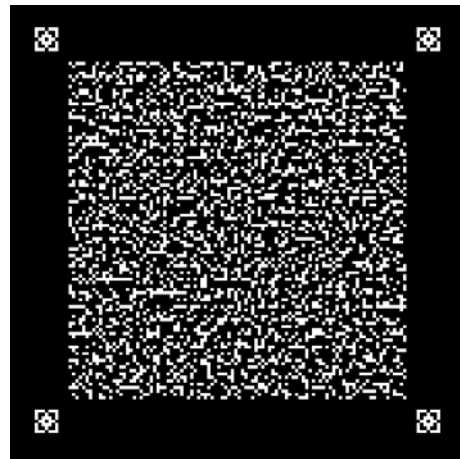
図 4.3 球面収差を付与した例

図 4.1 に示す実験系により所定の波面収差を与える各パラメータの設定を決定し、さらに光路内にクロム膜で作製した信号パターンを設置して、CCD により画像の歪および収差が付加された信号に対し FIR フィルタを適用して SNR の特性に対する効果を評価した。この評価では媒体にホログラムを記録するのではなく、収差を付加した画像に対し直接 FIR フィルタを適用してその効果を検証したものである。

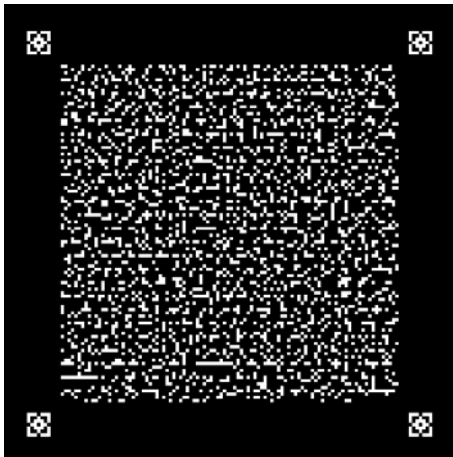
一方、本研究では変調符号の違いによる画質への影響を調べるために、変調なし、10/16 変調符号、12/16 変調符号、2/4 変調符号の 4 種のデータのクロムマスクを作成した。作成したこれらのクロムマスクデータパターンを図 4.4 に示す。



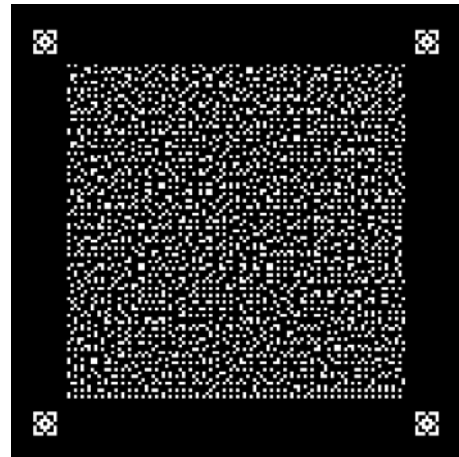
(a) 無変調 (10,000 bits)



(b) 12/16 変調符号 (7,500 bits)



(c) 10/16 変調符号 (6,250 bits)



(d) 2/4 変調符号 (5,000 bits)

図 4.4 作成したクロムマスクデータパターン

収差を付与した画像に対してフィルタ処理を行ったときの実験結果について以下に示す. ここでは最初に全収差量 rms に対する SNR を評価した. rms は全収差量を表す指標であり, 各ゼルニケ計数を用い式(4.1)で表される[1].

$$\text{rms} = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 + \cdots + z_9^2 + z_{13}^2} \quad (4.1)$$

rms 値と SNR との関係を示す. 図 4.5 は球面収差をメインに与えた画像に対する SNR 特性である. 球面収差が最も大きい, 他の収差も混在している. しかし, ほぼ球面収差の影響とみて測定している. 以下同様な考え方で測定さ

れている。(4.1)からもわかるように画像はすべての収差量を含んでいるが、その中でもある収差量だけを他のものより多く付加することで、その収差に対して LMMSE および QMMSE により最適化した FIR フィルタ、また Volterra equalizer の効果がどれほどあるのかを検討した[2-4]。またフィルタを適用する実験画像の変調符号は 10/16 符号、12/16 符号の 2 つを用いた。この結果を以下に記す。(図 4.5-4.10)

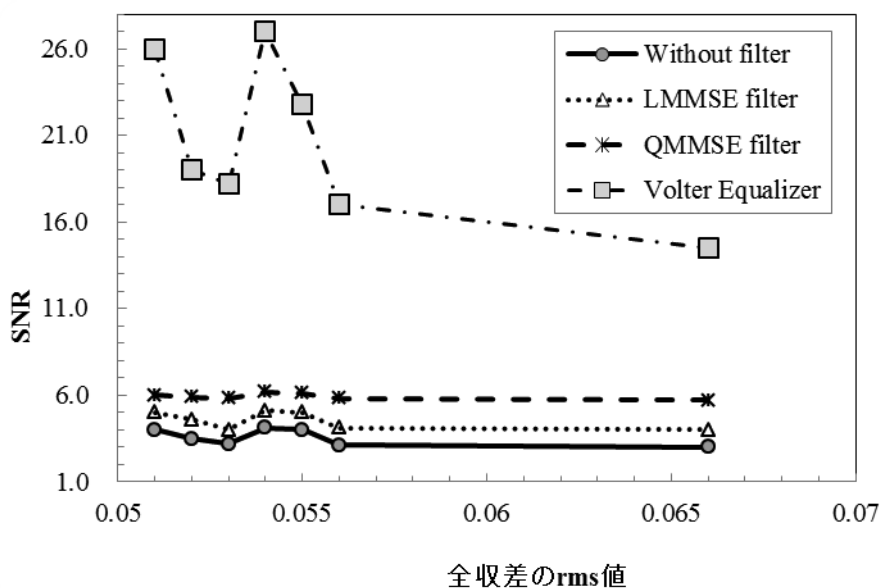


図 4.5 10/16 符号の画像のフィルタ適応による SNR の評価 (球面収差)

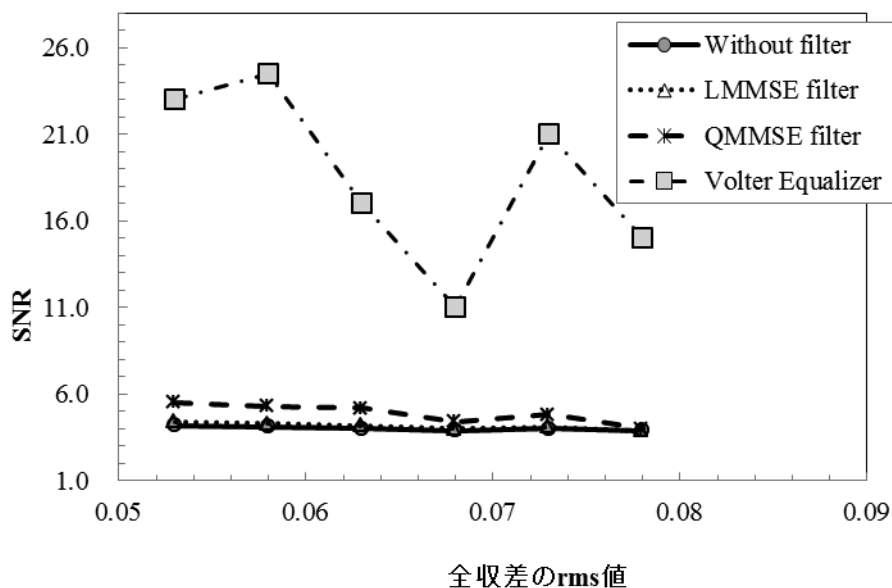


図 4.6 10/16 符号の画像にフィルタ適応による SNR の評価 (コマ収差)

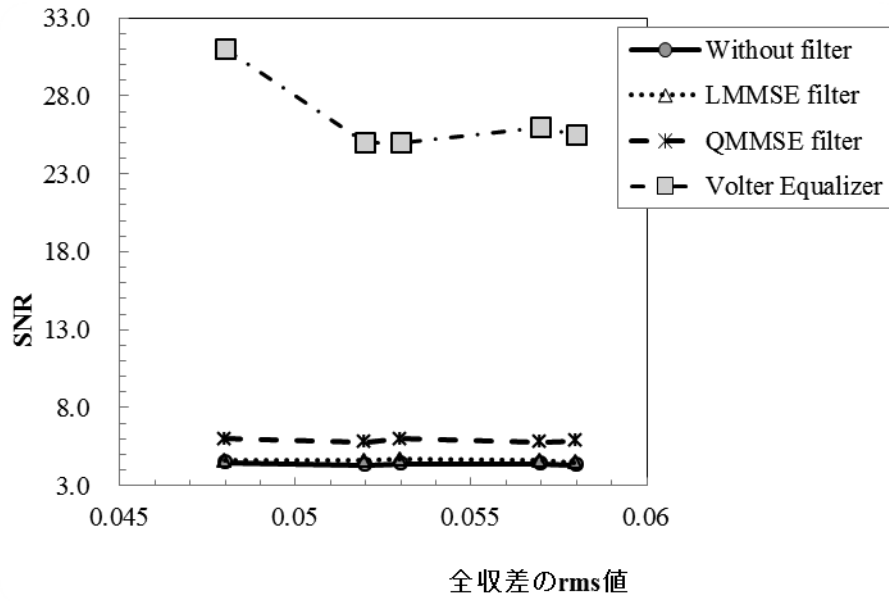


図 4.7 10/16 符号の画像にフィルタ適応による SNR の評価 (非点収差)

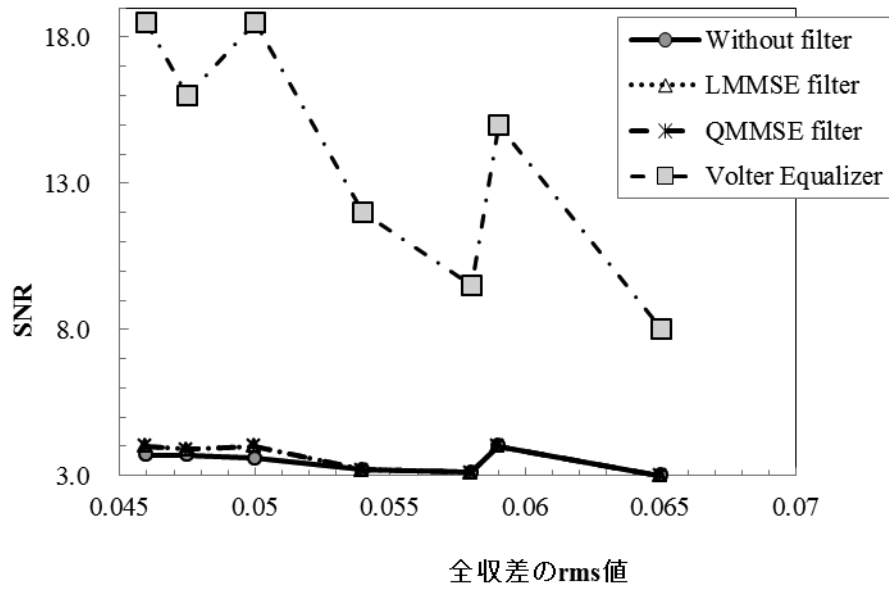


図 4.8 12/16 符号の画像にフィルタ適応による SNR の評価 (球面収差)

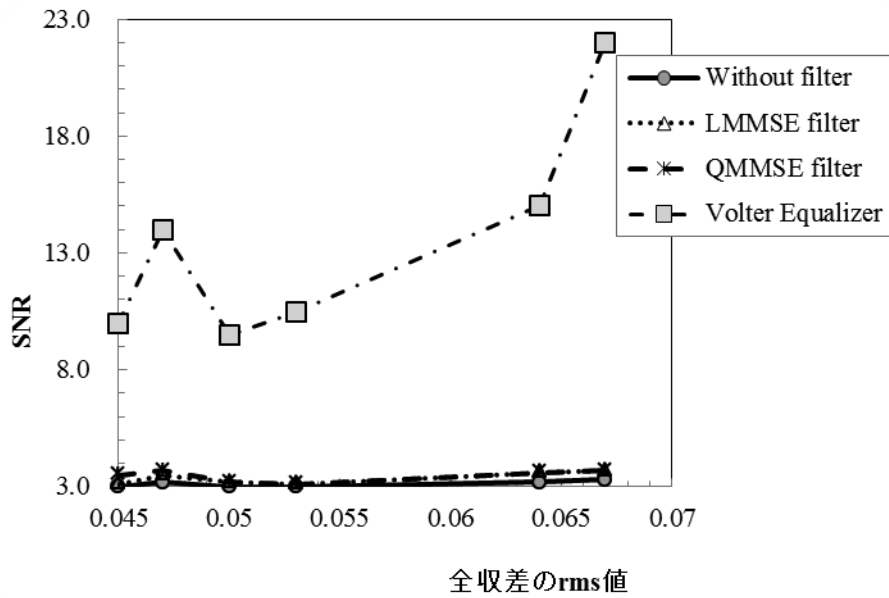


図 4.9 12/16 符号の画像にフィルタ適応による SNR の評価 (コマ収差)

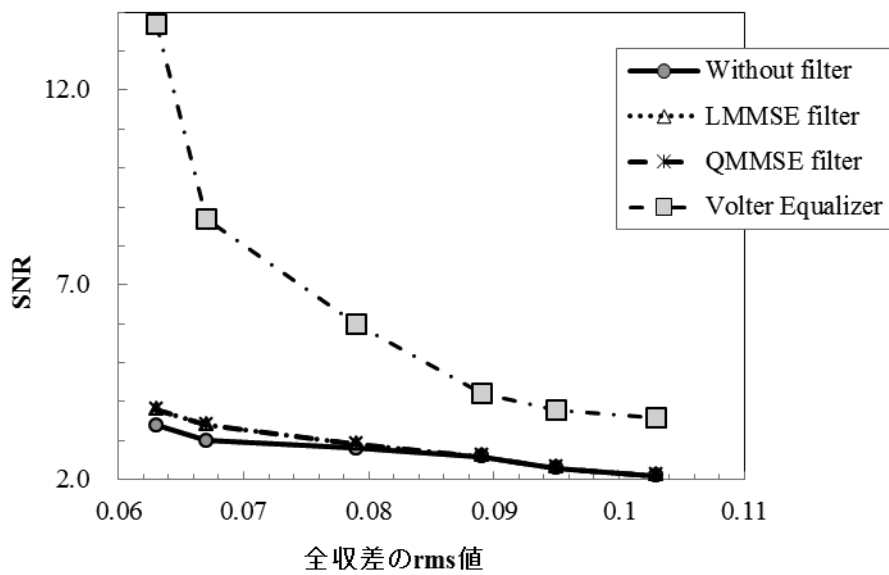


図 4.10 12/16 符号の画像にフィルタ適応による SNR の評価 (非点収差)

これらの結果より、どの収差に対しても Volterra equalizer が信号品質の改善に非常に大きな効果を示していることが分かる。収差により生じた複雑な符号間干渉に対して、Volterra equalizer の非線形項が有効であると言える。

図 4.11 に Volterra equalizer の収束特性を示す。横軸は反復回数、縦軸は BER である。どの収差に対しても 100 回程度の最適化で BER が収束していることが分かる。また、球面収差に対しては、最適化を繰り返しても一定のエラーが残

っていることが読み取れる．最適化の過程で，局所解に陥っている可能性が考えられる．

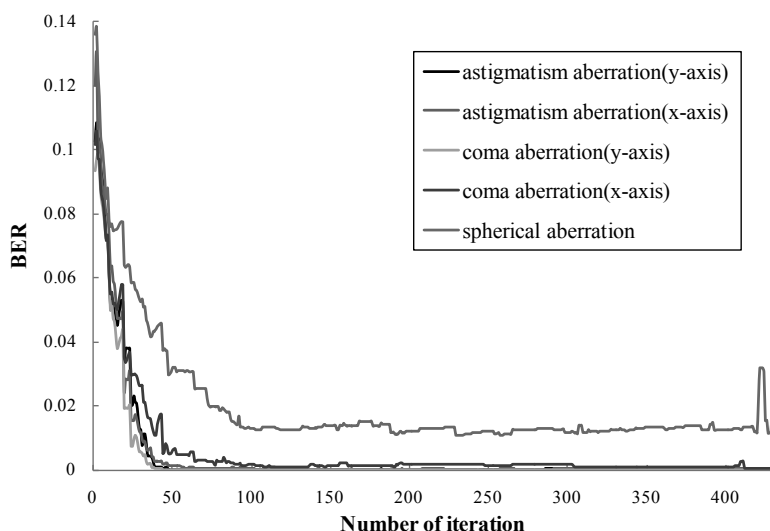


図 4.11 Volterra Equalizer 適用時における，収差毎の BER の比較

4.2 記録再生画像に対するフィルタの効果の検討

参照光に波面収差を与えて，実際に記録後再生した画像に対し FIR フィルタを適用してその効果を検証した．参照光にのみ波面収差を設定した理由は，通常再生互換性すなわち記録済のメディアを他のドライブで再生するとき再生光である参照光の波面収差の影響で互換性に大きな困難を発生させることが問題となっていたからである．信号光の光学系は，比較的無収差のレンズ設計および作製がなされるため，収差を付与しなかったこと，および位相共役再生が行われていたため信号光の光学系の収差の影響は比較的低いことが考えられていたためである．また，この光学系は収差を与える手段および収差測定系が他の co-axis 記録再生系および monocular 記録再生系と比較して容易に設定できるため採用している．

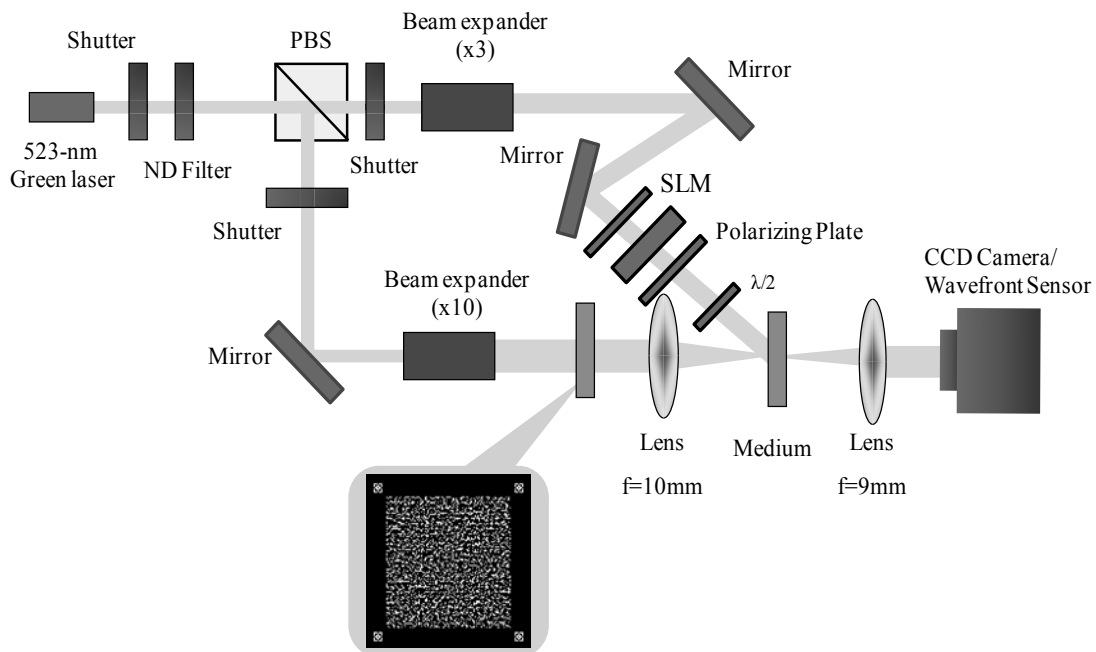


図 4.12 記録再生光学系の構成

図 4.12 に信号評価のための具体的な記録再生光学系を示す。参照光に対し液晶の透過型デバイスを設置し、参照光に収差を付与している。また、分割されたもう一方のレーザーは信号光として用い、クロムマスクデータ領域に合わせるため、ビームエキスパンダによりビーム径を調節した。焦点距離 100 mm のレンズで集光させ、フォトポリマーに照射してホログラムを記録する。図 4.13 に 10/16 変調符号について実際に収差を加えたときの記録再生後のデータイメージの全体像を示す。第 4.1 節で示した収差付与の方法を用いて、再生信号における収差の影響を検討した。記録再生にはフォトポリマー記録媒体を用いている。図 4.14 には参照光における全収差量が 0.02λ の場合の再生信号を示す。記録後、参照光に収差を与えて信号に与える影響を検討した。この場合記録時では参照光に収差を与えず、再生時のみで収差を参照光に与えている。付与する収差は第 4.1 節に示すように、例えば非点収差、コマ収差あるいは球面収差のパターンで SLM を駆動し、その階調レベル（濃淡レベル）を変化させることによって、全収差の RMS 値を変化させる。ただし、本収差付与法は最大の RMS 値が 0.07λ 程度が限界であった。

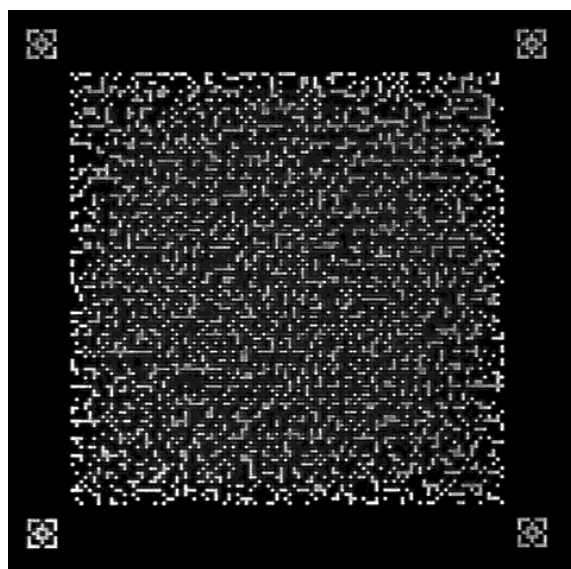
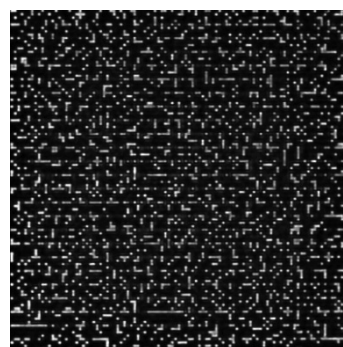


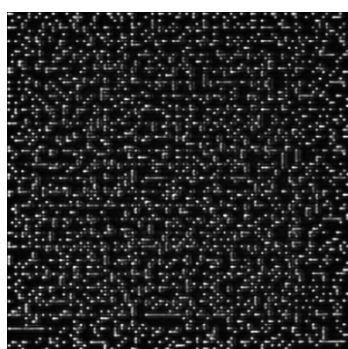
図 4.13 記録再生画像



(a) 記録データ



(b) 3次非点収差



(c) 3次コマ収差



(d) 3次球面収差

図 4.14 収差を付与した場合の記録再生画像

本実験系において非点収差パターンを付与した場合のビット誤り率と SNR との関係性を測定した結果を図 4.15 に示す. 実験で得られた再生画像に対し, フィ

ルタがない場合と LMMSE フィルタおよび RCGA フィルタ[5-8]を適用した結果を示す。LMMSE フィルタおよび RCGA フィルタともビット誤り率の低減に効果があるが、特に RCGA フィルタで改善効果がみられる。

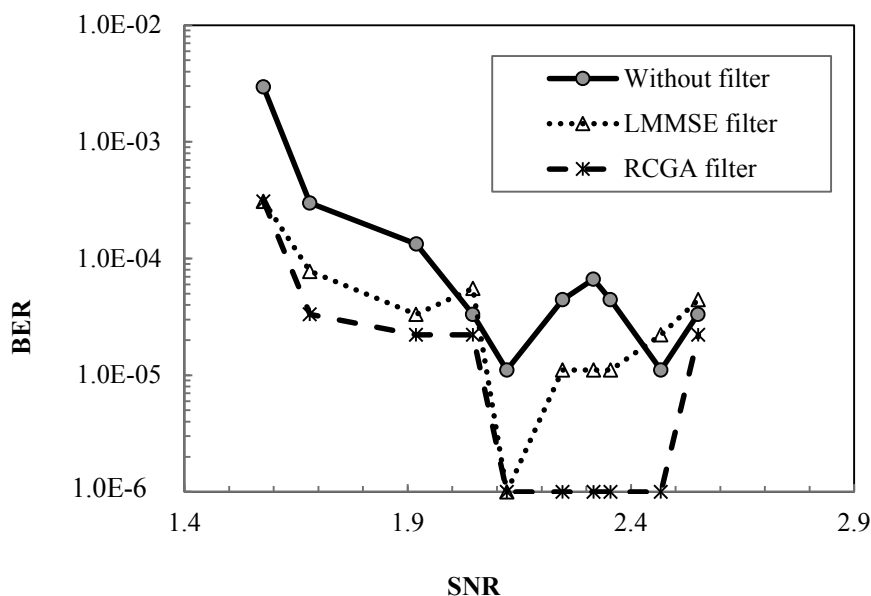


図 4.15 FIR フィルタ適応による BER の評価(Off-axis)

4.3 Co-axis 方式による再生信号評価

一方、実システムの高密度記録再生条件における FIR フィルタの効果およびフィルタ係数の最適化に関する検討を行うため、既に外部機関で検討されている Co-axis 記録再生系および Monocular 記録再生系[7-11]で得られている再生信号に対しフィルタを適用し、ビット誤り率および信号対雑音比の改善効果について評価した。それぞれの光学系を用いて得られた再生信号に対してフィルタを適用し、その効果の評価した。

Co-axis 方式の光学的配置を図 4.16 に示す。信号光と参照光は同一光軸上に配置され、参照光がランダムに位相変調あるいは振幅変調を与えられているのが特徴である。本評価装置において信号パターンに対して多重記録の方向を図 4.17 に示す。矢印の方向にシフト多重記録を行う。本論文で検討したシフト量は 2, 3, 4, 5, 8 μm である。

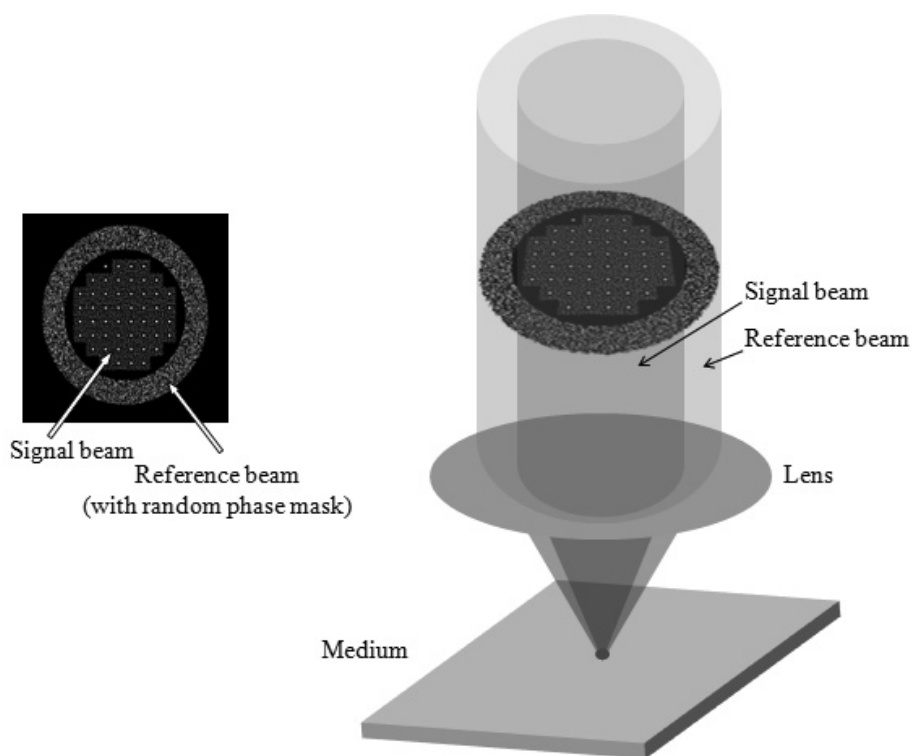


図 4.16 Co-axis 型記録方式の信号光および参照光の配置

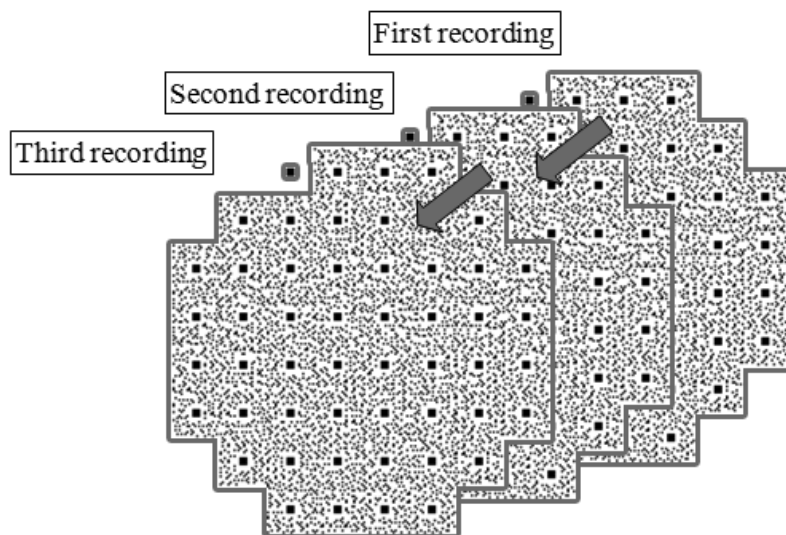


図 4.17 Co-axis 記録における多重方向

Co-axis 方式光学系の実験で得られた画像に対して LMMSE および RCGA により係数設計した FIR フィルタを適用した場合と FIR フィルタを適用しなかった場合のビット誤り率の評価結果を図 4.18 に示す。

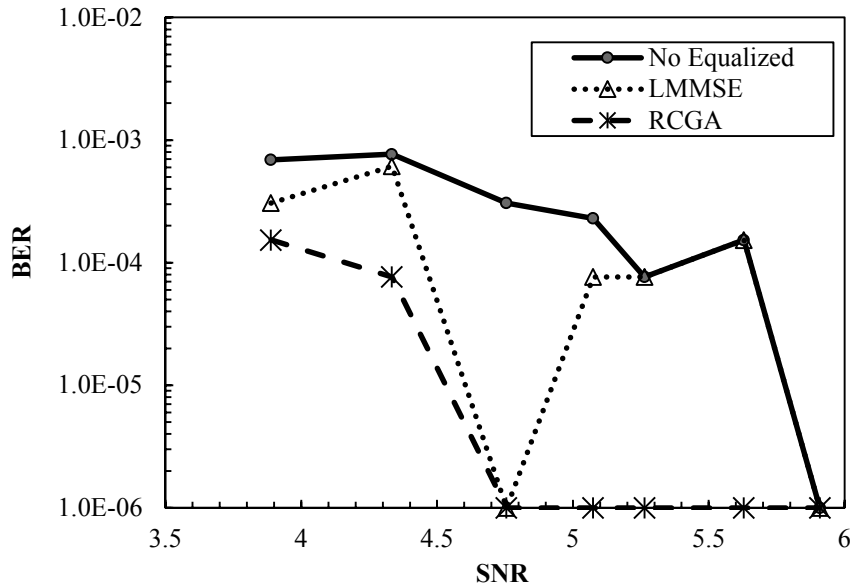


図 4.18 FIR フィルタ適応による BER の評価(Co-axis)

この結果より，LMMSE を適用したフィルタ設計では RCGA を用いたフィルタ設計手法に比べて BER 改善効果が小さい場合も起こりうるということがわかる．その原因としては，LMMSE を含め，勾配を利用した設計手法は局所解に陥る可能性があるためと想定される．一方 RCGA などの進化的アルゴリズムを採用することで，よりグローバルな最適化を行える．

4.4 Monocular 方式による再生信号評価

既に外部機関で検討されている Monocular 記録再生系で得られている再生信号に対しフィルタを適用し，ビット誤り率および信号対雑音比の改善効果について評価した．それぞれの光学系を用いて得られた再生信号に対してフィルタを適用し，その効果の評価した．外部機関で検討されている Monocular 記録再生系では，1 ページ当たりの情報量が 1000×1000 ビットを超えるデータパターンであり，高密度記録におけるフィルタの効果を検証することが狙いである．

Monocular 方式で用いたページデータを図 4.19 に，再生画像を図 4.20 にそれぞれ示す．ここで示したページデータは ECC として低密度パリティ検査符号 (LDPC) を採用し[9, 10]，変調は行っていない．

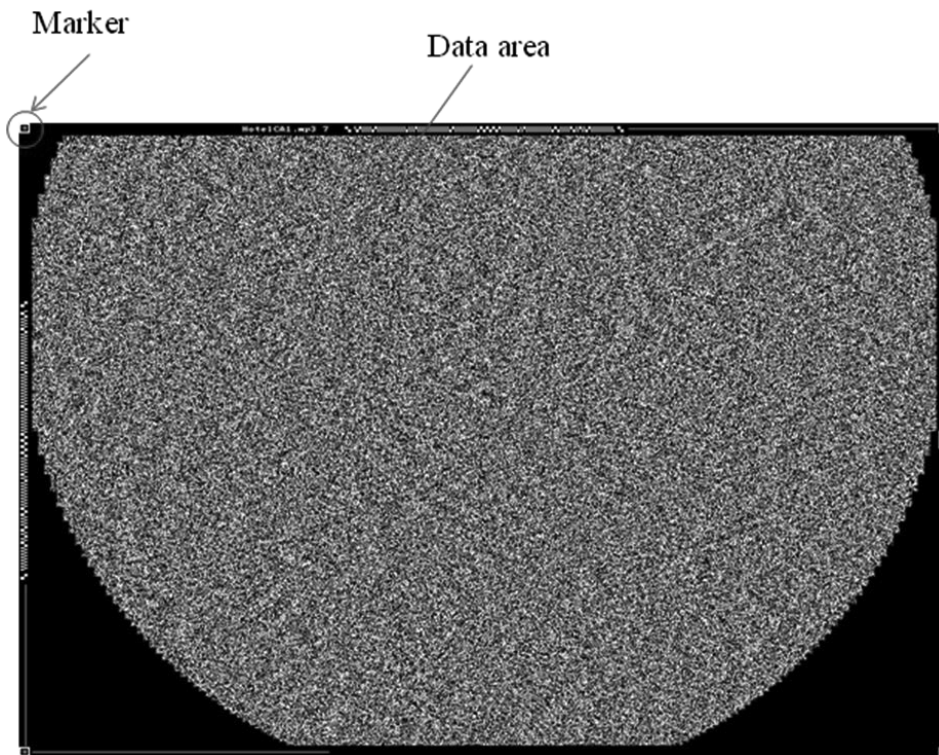


図 4.19 Monocular 記録多重光学系で用いたページデータ

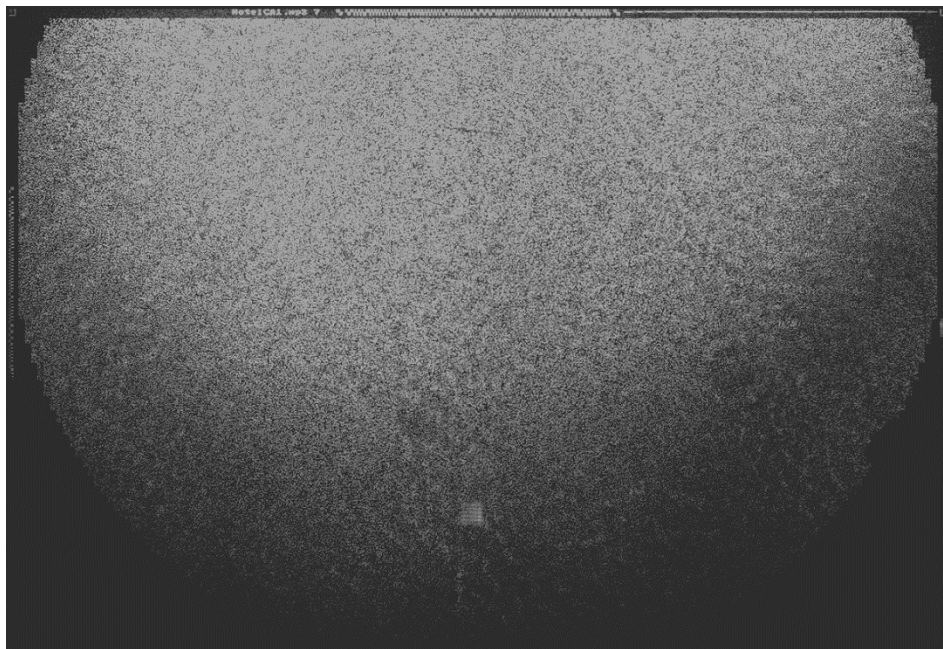


図 4.20 Monocular 記録多重光学系における再生画像

次に Monocular 方式で再生された画像に対して信号処理を行ったときの結果を示す。図 4.21 は再生画像に対して AGC 処理を施した後、Volterra equalizer でフィルタ処理を行ったときの復元画像である。

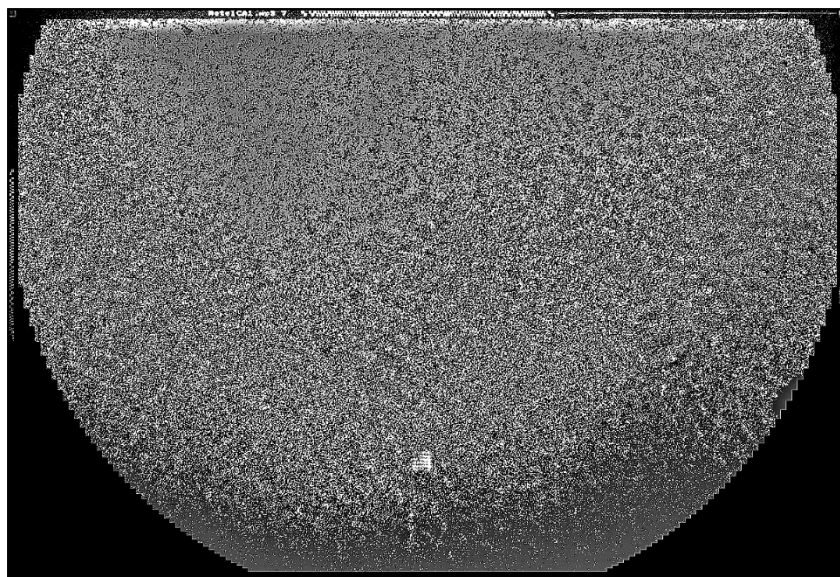


図 4.21 フィルタ処理後のデータイメージ

図 4.22, 4.23 はフィルタ処理前後のエラーマップである。画像中の赤く表示されたピクセルがエラーとして認識された部分である。エラーの判定は 2 値化の後に元のページデータと比較することで行った。

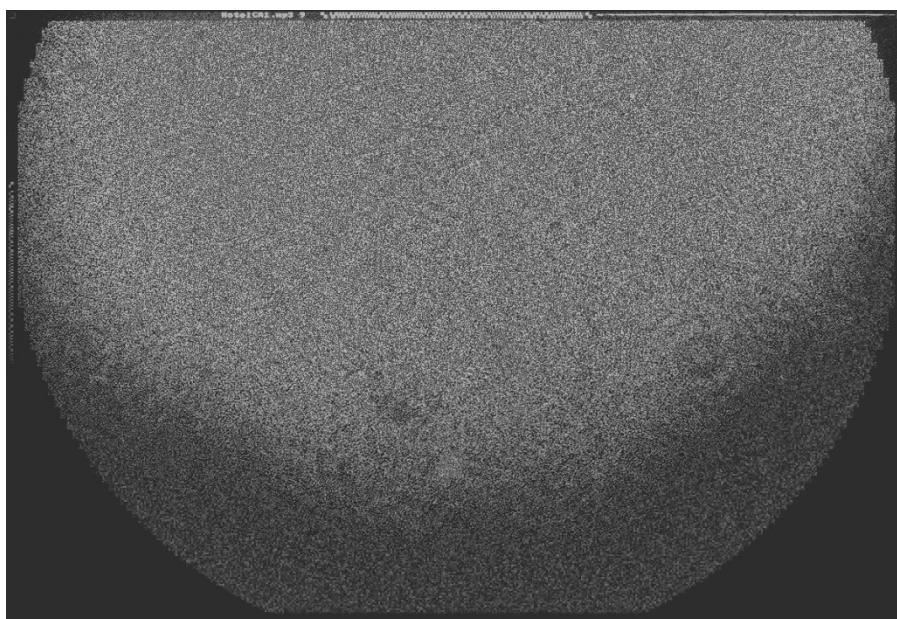


図 4.22 フィルタ処理前のエラーマップ

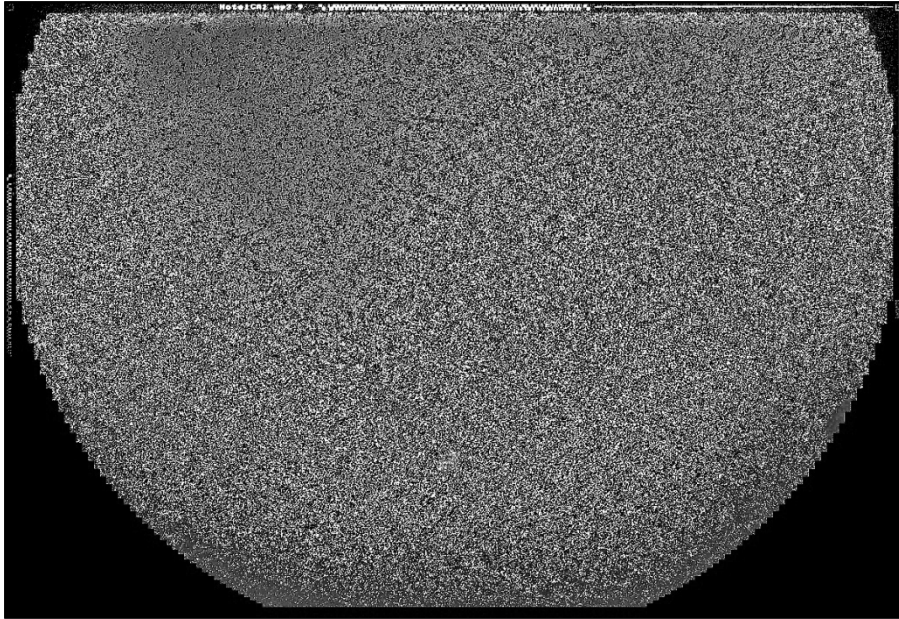


図 4.23 フィルタ処理後のエラーマップ

図 4.22 が示すように、信号の周縁部にエラーが集中している。これは輝度のムラによるもので、AGC と Volterra equalizer により信号品質が改善していることが分かる。図 4.24, 4.25 は Volterra equalizer でフィルタ処理したときの BER 及び SNR の収束特性である。

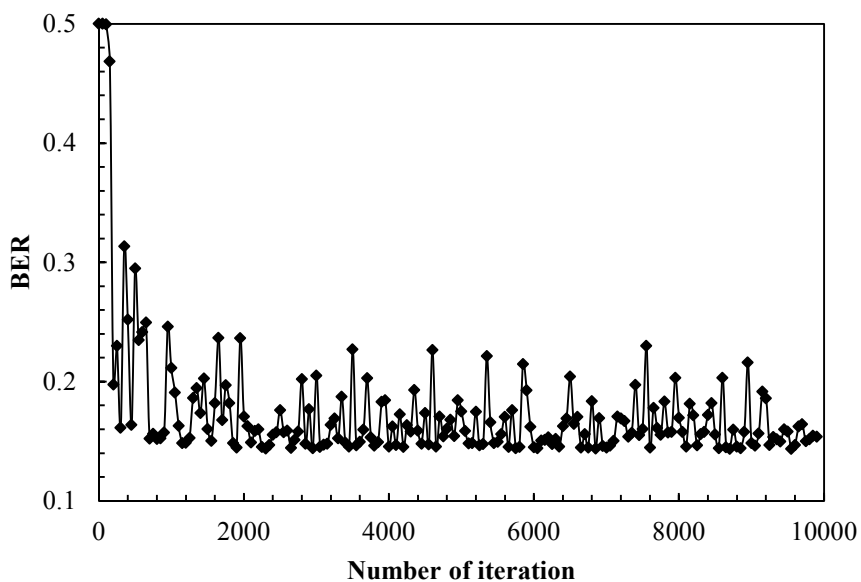


図 4.24 Volterra Equalizer による BER 特性

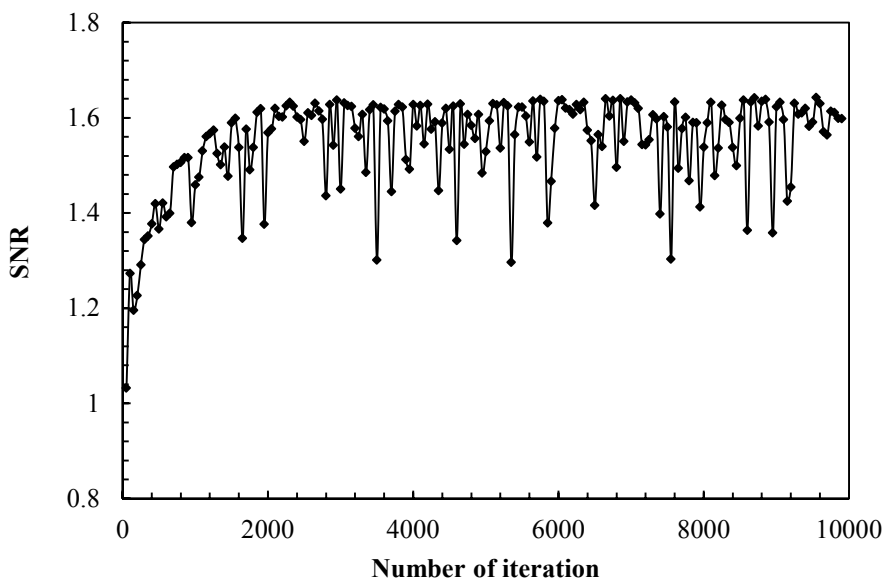


図 4.25 Volterra Equalizer による SNR 特性

変調符号を採用した場合と比較して，収束に要する反復回数が多くなっていることが分かる．また，概ね 2000 回程度の反復で BER, SNR とも収束していることが分かる．

図 4.26, 4.27 は各フィルタの効果を SNR, BER 特性で比較したものである．

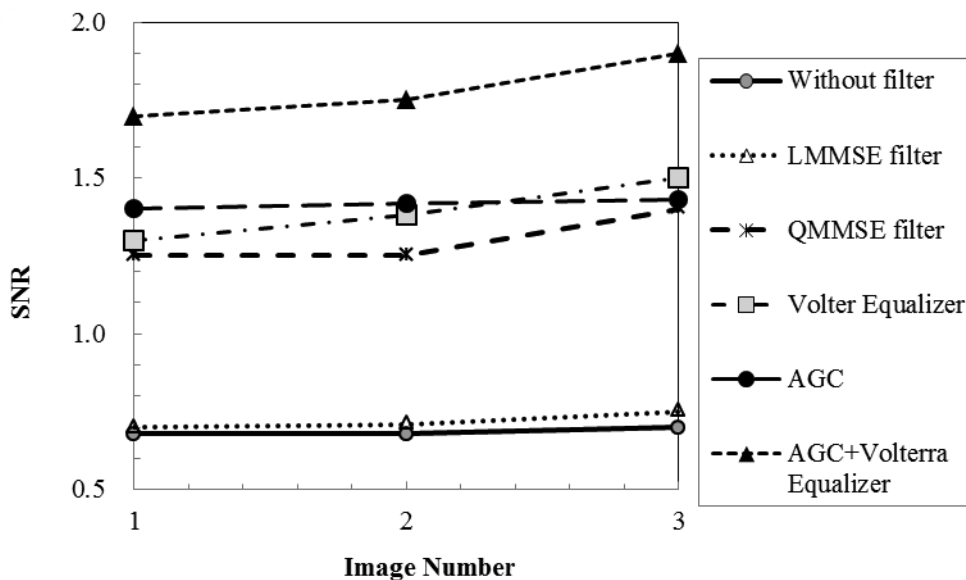


図.4.26 フィルタ形式毎の SNR 特性

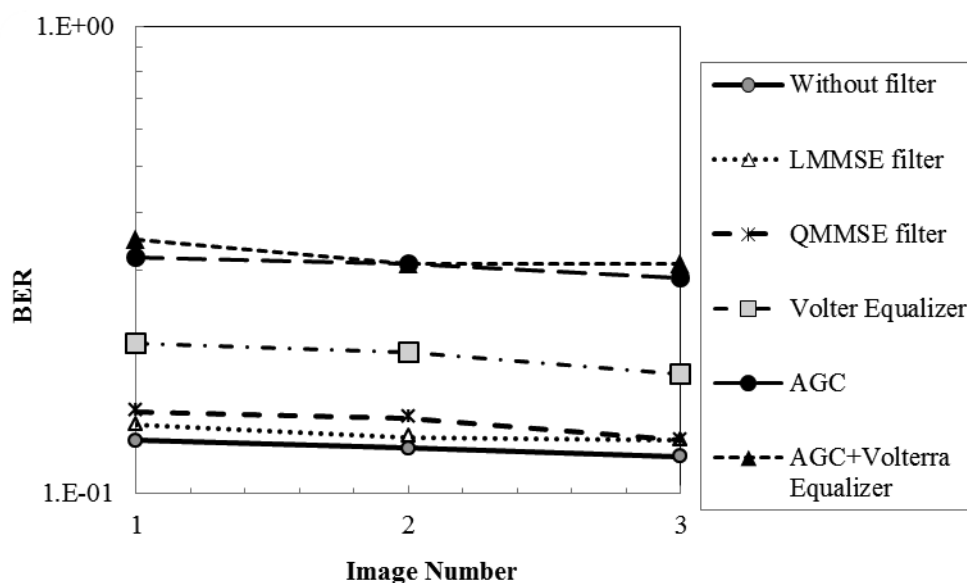


図 4.27 フィルタ形式毎の BER 特性

どのデータに対しても AGC と Volterra equalizer が信号品質の改善に最も効果があることが分かる。光学系により生じた非線形な歪みに対して、非線形項を含むフィルタが有効であると言える。

4.5 結言

本章ではホログラフィックデータストレージの再生画像に対する FIR フィルタ処理及び Volterra Equalizer の有効性を明らかにした。

また、10/16, 12/16 変調符号のそれぞれの画像に対してフィルタを適用することは効果があることが確認された。また球面収差, コマ収差, 非点収差すべてに対してフィルタの効果が確認された。LMMSE により設計したフィルタを適用するよりも QMMSE により設計したフィルタを適用する方が、効果がみられ、また QMMSE により設計したフィルタを適用するよりも Volterra Equalizer を適用するほうが SNR の改善が顕著だった。このことから高次項を含む非線形フィルタが SNR を改善に効果があることが分かる。

参考文献

- [1] 渋谷真人, 大木裕史, 「大木 裕史」, (朝倉書店, 2005, 東京) .
- [2] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, “Application of Linear and Nonlinear Equalization Methods for Holographic Data Storage,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 1079-1083 (2006).
- [3] M. Keskinöz, B. V. K. V. Kumar, “Application of linear minimum mean-squared-error equalization for volume holographic data storage,” *Appl. Opt.* **38**, 4387-4393 (1999).
- [4] A. He, G. Mathew, “Nonlinear equalization for holographic data storage systems,” *Appl. Opt.* **45**, 2731-2741 (2006).
- [5] L. Davis: *The Handbook of Genetic Algorithms* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1990).
- [6] L. J. Eshleman, J. D. Schaffer: “Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata,” in *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol. 2, 187-202 (Morgan Kaufmann Publishers, Massachusetts, 1993).
- [7] C. Z. Jonikow, Z. Michalewicz: “An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representations in Genetic Algorithms,” *Proc. Forth Int. Conf. on Genetic Algorithms*, 31-36 (1991).
- [8] Z. Michalewicz: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
- [9] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres: *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (John Wiley & sons, New York, 2010).
- [10] H. Pishro-Nik, N. Rahnavard, J. Ha, F. Fekri, and A. Adibi, “Low-density parity-check codes for volume holographic memory systems,” *Appl. Opt.* **42**, 861-870 (2003).

第5章 ランレングス制限符号適用による記録密度改善検討

5.1 ナイキスト開口による帯域制限

まず光学的空間フィルタリングについて説明する. 1つ目のフーリエ面上に配置したナイキスト開口を通過することで, 記録に不可欠な低域信号成分以外の高域信号成分が除去される[1-3]. これにより記録媒体へのレーザー露光領域を限定し, 媒体消費を抑えることが可能となるので記録密度を向上することが考えられる. この光学的空間フィルタリングのモデルを図 5.1 に示す.

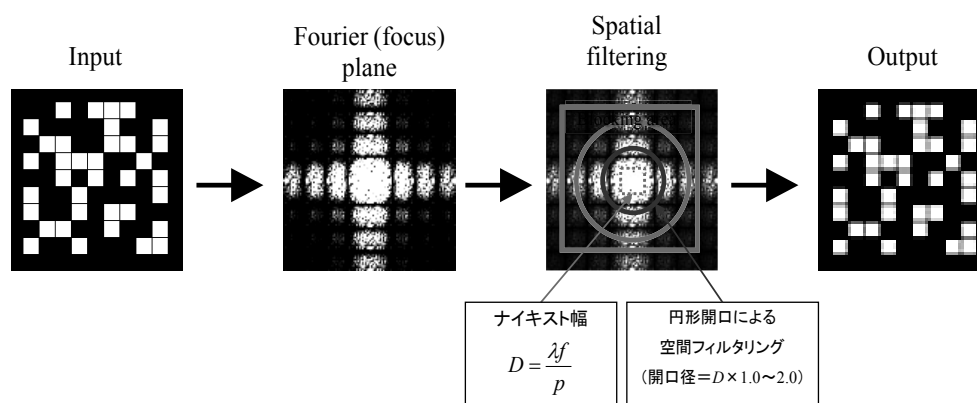


図 5.1 ナイキスト開口によるフィルタリングの概念図

ナイキスト開口サイズの規定に関わるところの λ はレーザー光波長, p は SLM のピクセルピッチを示している[4, 5]. 開口の形状に関しては, ナイキストサイズの 1.0 倍から 2.0 程度の矩形型開口または円形型開口で実現される事が一般的である. 開口径が大きいほど, 高周波成分を多く含んでいるので元の信号に近い信号が出力される. このとき, 図 5.1 に示した赤点線領域内の空間周波数であれば入力信号の復元に十分な出力信号を得ることができる. しかし, 高周波成分がカットされるために, ピクセル間干渉が増大するので, 信号品質に劣化を生じる要因ともなる. ランレングス制限(RLL)符号[6, 7]を導入することで, 信号品質を維持したままホログラムサイズを縮小することができるため, 記録密度の改善が期待できる. 本研究ではフーリエ変換光学系の特長を生かしたホログラフィックデータストレージ向けの高効率な RLL 符号を構成し, その評価を行った.

5.2 符号化効率の評価

ここでは 1 次元の RLL 変調符号[8]の符号化効率について考察する. 符号長 $n \geq 3$ の RLL(1, x)変調符号を考えると, 符号語の終端 3 ビットとして考えられるのは(000), (011), (100), (111)のいずれかである. このとき, (000)で終わる符号語数を x_1^n とし, 同様に(011), (100), (111)で終わる符号語数を x_2^n, x_3^n, x_4^n と表すことと

する．たとえば， $n = 3$ のとき，RLL(1, x)変調符号で許容される符号語は (000), (111)なので， $\mathbf{x}^3 = (1, 0, 0, 1)$ となる．同様に， $n = 4$ のときは (0000), (0011), (1100), (1111)なので $\mathbf{x}^4 = (1, 1, 1, 1)$ ， $n = 5$ のときは(00000), (11000), (00011), (11100), (00111), (11111)なので $\mathbf{x}^5 = (2, 1, 1, 2)$ となる．符号長 n の RLL(1, x)変調符号の全符号語数 M_2^n は $M_2^n = \sum x_i^n$ である． \mathbf{x}^n に対しては次に示す漸化式が成り立つ

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}^n \quad (n \geq 3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

式(5.1)において， $\mathbf{x}^3 = (1, 0, 0, 1)$ という初期値では $x_1^n = x_4^n, x_2^n = x_3^n$ が成り立つため，式(5.1)は次のように簡単化できる

$$\begin{pmatrix} x_1^{n+1} \\ x_2^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^n \\ x_2^n \end{pmatrix} \quad (n \geq 3). \quad (5.2)$$

次に符号長 $n \geq 5$ の RLL(2, x)変調符号の場合を考える．符号語の終端 5 ビットとして考えられるのは(00000), (00111), (01111), (10000), (11000), (11111)のいずれかであり，それぞれに分類される符号語数を $x_1^n, x_2^n, x_3^n, x_4^n, x_5^n, x_6^n$ とする．このとき初期値は $\mathbf{x}^5 = (1, 0, 0, 0, 0, 1)$ なので，RLL(1, x)変調符号の場合と同様に $x_1^n = x_6^n, x_2^n = x_5^n, x_3^n = x_4^n$ が成り立ち，

$$\begin{pmatrix} x_1^{n+1} \\ x_2^{n+1} \\ x_3^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^n \\ x_2^n \\ x_3^n \end{pmatrix} \quad (n \geq 5), \quad (5.3)$$

という漸化式が得られる．同様に続けていくと，RLL(d , x)変調符号については次の漸化式が成り立つ

$$\begin{pmatrix} x_1^{n+1} \\ x_2^{n+1} \\ \vdots \\ x_{d+1}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ & & & & \\ & & \mathbf{1} & & \\ & & & \mathbf{0} & \\ & & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^n \\ x_2^n \\ \vdots \\ x_{d+1}^n \end{pmatrix} \quad (n \geq 2d+1). \quad (5.4)$$

式(5.4)において、 $\mathbf{1}$ と $\mathbf{0}$ はそれぞれ d 次の単位行列とゼロベクトルである。初期値 \mathbf{x}^{2d+1} は $\mathbf{x}^{2d+1} = (1, 0, 0, \dots, 0)$ 、全符号語数 M_d^n は $M_d^n = 2 \sum x_i^n$ である。

RLL(d, x)変調符号の符号化効率 η_d^n は次の式で定義される

$$\eta_d^n = \frac{\log_2 M_d^n}{n}. \quad (5.5)$$

図 5.2 に、符号長を変化させたときの RLL 変調符号の符号化効率を示す。横軸は符号長、縦軸は符号化効率であり、RLL(1, x)から RLL(7, x)について評価を行った。これらの結果から、最小ランレングス d を大きくすると符号化効率が低下することが分かる。また、符号化効率低下の幅は d が大きくなるにつれて小さくなっている。

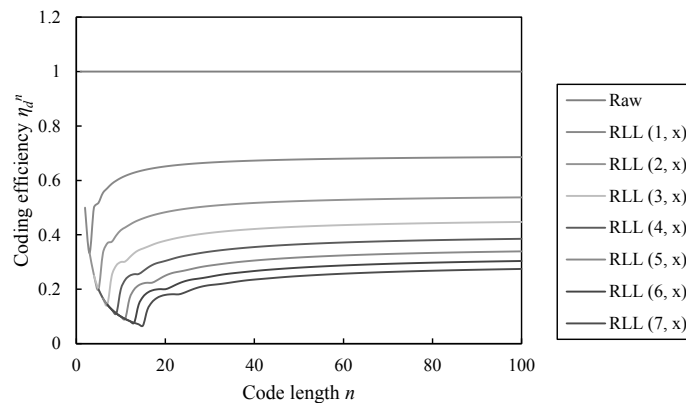


図 5.2 RLL 変調符号の符号化効率。

図 5.3 に符号長と記録密度の関係を示す。RLL(d, x)変調符号ではプログラムのサイズが x 方向に $1/(d+1)$ となるため、ここでは記録密度 ρ_d^n を $\rho_d^n = (d+1)\eta_d^n$ で定義した。最小ランレングス d を大きくすることで記録密度が向上することが分かる。符号長が十分長ければ、RLL(5, x)変調符号で記録密度は 2.0 を超える。

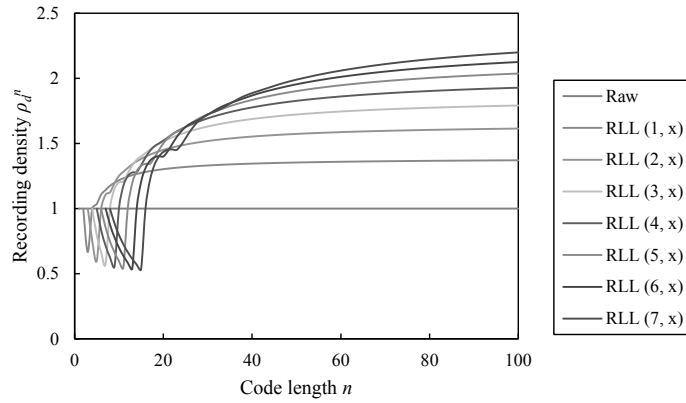


図 5.3 RLL 変調符号の記録密度.

次の図 5.4 に $n \rightarrow \infty$ としたときの符号化効率と記録密度の最大値 η_d^∞ と ρ_d^∞ を示す. 符号化効率の最大値は以下の式で求められる[9].

$$\eta_d^\infty = \log_2 \lambda_{\max} \quad (5.6)$$

ここで λ_{\max} は式(5.4)の係数行列の最大実数固有値である. この結果より符号長が十分長ければ, 無変調のページデータと比較して原理的には 2 倍以上の記録密度を達成できることが分かる.

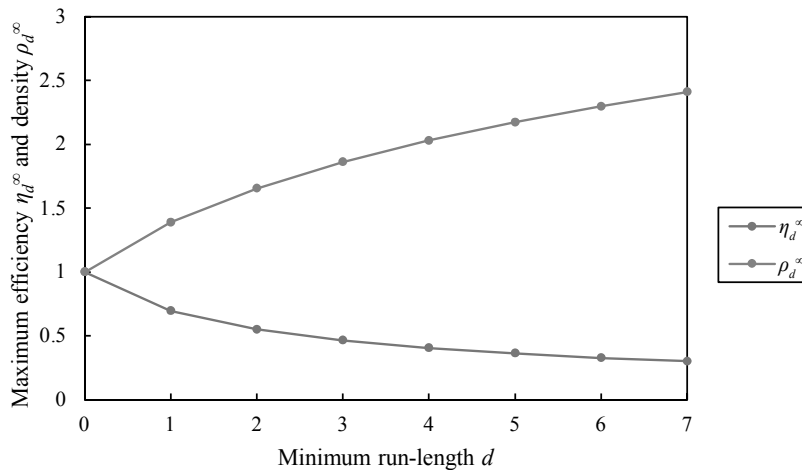


図 5.4 符号化効率と記録密度の理論的境界

5.3 シミュレーションによるエラー特性の評価

本節では RLL 変調符号の実効的な性能を評価する. 具体的には RLL 変調符号を用いて変調した 2 次元ページデータを, 空間フィルタ (ローパスフィルタ) を用いて帯域制限し, ビットエラーレート(BER)を評価する. このとき, 空間フィルタの x 方向のサイズ D_x を変化させながら評価を行う. なお, フィルタサイズは図 5.5 のように D を基準に設定し, y 方向のフィルタサイズは D に固定とする.

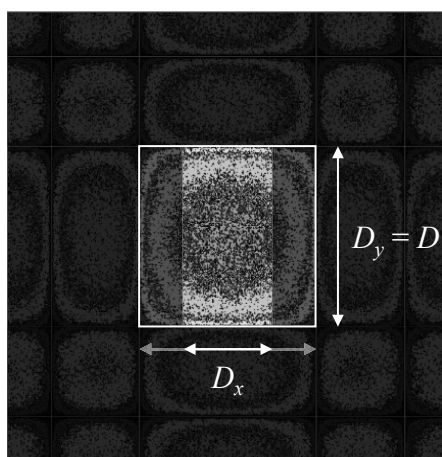


図 5.5 空間フィルタの適用.

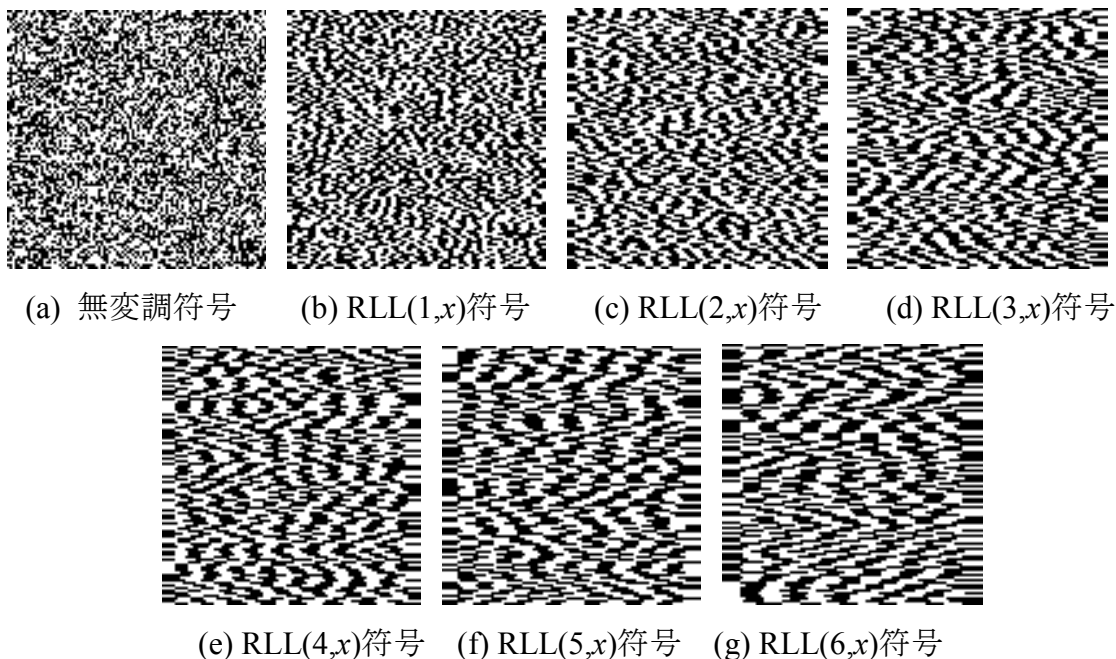


図 5.6 100 bits \times 100 bits の各入力画像

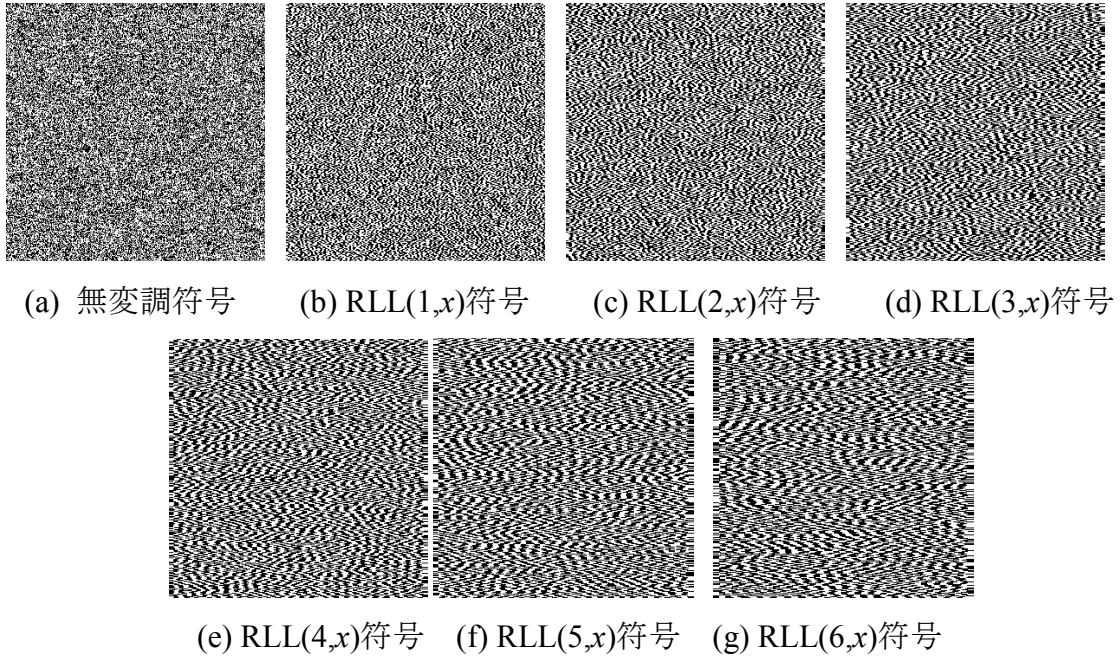


図 5.7 300 bits × 300 bits の各入力画像

図 5.8 にフィルタサイズを変化させたときの BER の評価結果を示す。なお、エラーは、出力画像を 2 値化してオリジナルの画像と比較することで判定した。図 5.8(a), (b) はそれぞれ 100×100 と 300×300 のページデータを評価した結果である。横軸は x 方向のフィルタサイズ、縦軸は BER である。

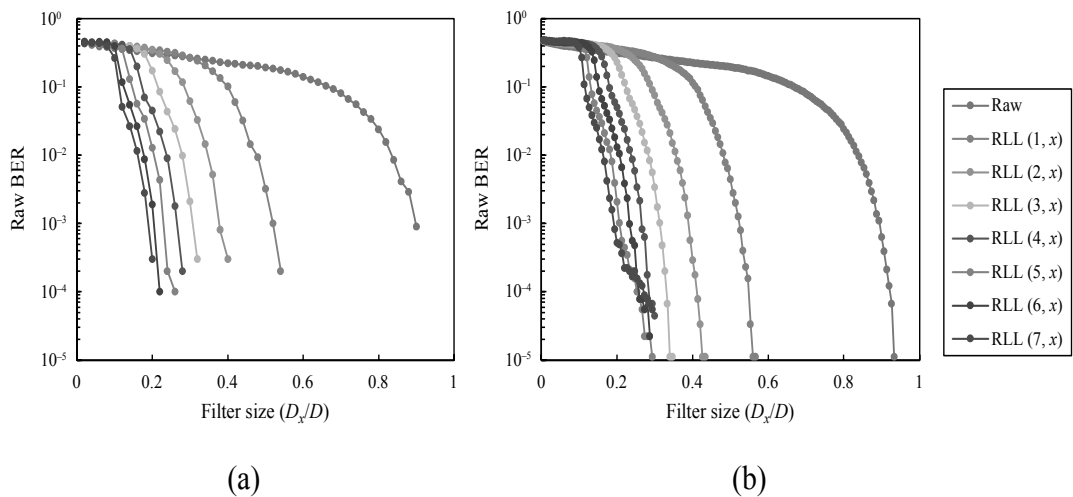


図 5.8 フィルタサイズと BER の関係。(a) 100×100 . (b) 300×300 .

100×100 , 300×300 のページデータとも似た特性を示している。最小ランレングス d を大きくすることで、強い帯域制限をかけてもエラーが表れないことが分

かる。

次に実効記録密度について評価する。実効記録密度 e_d^n は、RLL(d, x)変調符号の符号化効率 η_d^n を、エラーフリーとなる最小のフィルタサイズ W_d で割った値 $e_d^n = \eta_d^n / W_d$ で定義する。このとき、無変調のページデータに対して、エラーフリーとなる最小のフィルタサイズ W_0 を $W_0 = 1.0$ とする。図 5.9 に最小ランレングスを変化させたときの実効記録密度の評価結果を示す。評価は 100×100 と 300×300 のページデータに対して行った。

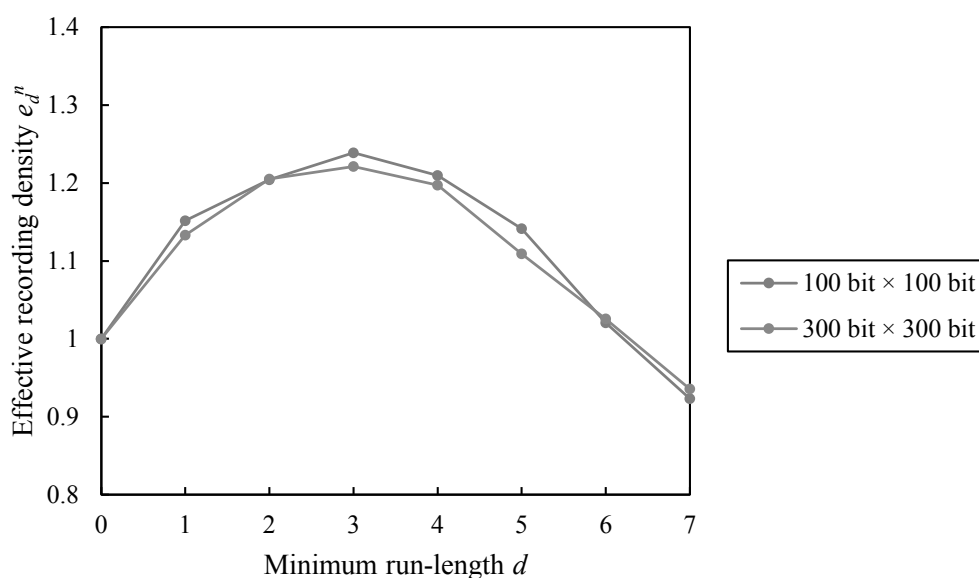


図 5.9 実効記録密度。

100×100 , 300×300 のページデータとも最小ランレングスが 4 のときに、最も高い実効記録密度を示している。このときの実効記録密度は 100×100 で 1.24, 100×100 で 1.22 である。図 5.4 に示した理論的限界値と比較すると記録密度は大幅に低下しているが、RLL 変調符号を使用することで実際の光学系においても 20%以上の高密度化が期待できることが分かる。

5.4 結言

本研究ではナイキスト開口フィルタの適用およびホログラフィックデータストレージ向けの RLL 変調符号を構成し、その性能を評価した。ナイキスト開口フィルタを小さくすることで記録密度向上できることが確認でき、またサイズを小さくしても十分に 2 次元データを再生できることが確認できた。さらにランレングス制限符号で変調することでホログラムディスクの大容量化につながる事が分かった。理論的には符号長が十分に長ければ、無変調の場合と比較

して 2 倍以上の記録密度が得られることが分かった。また，現実的な状況における実効的な性能を評価し，20%以上の高密度化が可能であることを明らかにした。ホログラフィックデータストレージのさらなる大容量化のために本研究が有用な知見を提供できると期待できる。

参考文献

- [1] A. M. Glass, M. J. Cardillo, Hans J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox: *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- [2] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres: *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (John Wiley & sons, New York, 2010).
- [3] Lambertus Hesselink, Sergei S. Orlov, and Matthew C. Bashaw. Holographic data storage systems. *Proc. IEEE* **92**, 1231-1280 (2004).
- [4] 谷田貝豊彦, 「光とフーリエ変換」, (朝倉書店, 2012, 東京)
- [5] Joseph W. Goodman, 「フーリエ光学」原著第3版, (森北出版, 2012, 東京)
- [6] P. H. Siegel and J. K. Wolf, “Modulation and coding for information storage,” *IEEE Commun. Mag.* **29**, 68-86 (1991).
- [7] B. Marcus, P. Siegel, J. Wolf, “Finite-state modulation codes for data storage,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **10**, 5-37 (1992).
- [8] Y. Nakamura, K. Shimada, T. Ishii, H. Ishihara, M. Hosaka, and T. Hoshizawa, “High-Density Recording Method with RLL Coding for Holographic Memory System,” in *Nonlinear Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper OMB5.
- [9] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *Bell Syst. Tech. J.* **27** 379-423 (1948).

第6章 結論

序論で述べたように、全世界のデジタルデータは年率 40%程度で増大しており、2025 年には 200 ZB に到達すると言われている。これに伴ってアーカイブ市場の規模も拡大しており、特に、以下の 3 つの市場が、今後大きく拡大することが予想されている（括弧内の数値は 2018 年の市場規模予測）。

1. 従来型アーカイブ：公文書、映像アーカイブ等（74 億ドル）
2. クラウド型アーカイブ：コンテンツクラウド等（200 億ドル）
3. 新規アーカイブ：従来破棄していた情報を保存（430 億ドル）

従来型アーカイブでは高信頼性、高耐久性および長期保存性が求められ、クラウド型アーカイブおよび新規アーカイブでは記録容量とともにビットコストが重要視される。こうした要求を同時に満たすストレージはホログラフィックデータストレージしかなく、本研究がもつ社会的な意義は大きいと考えられる。

また上記の市場のうち新規アーカイブ市場の開拓には、低ビットコストのストレージの実現が鍵となる。現在、全世界で日々作成されるデータのうち、保存されているのはほんの一部である。ホログラフィックデータストレージによる低ビットコストストレージ実現により保存可能データが拡大することで、情報社会の質的変革とイノベーションによる新たな産業創出が期待できる。

6.1 本研究のまとめ

第 1 章では研究の背景と意義を述べるとともに、現在までのホログラフィックデータストレージの研究開発の動向を示した。

第 2 章ではホログラフィックデータストレージの基礎となるホログラフィーの記録と再生の原理を説明するとともに、ホログラムの記録方式についてまとめた。ホログラムの記録方式としては off-axis 型、co-axis 型、polytopic 型などが挙げられる。各方式の特徴を述べるとともに、利点と欠点を示した。

第 3 章ではホログラフィックデータストレージにおける信号処理の流れを示し、各プロセスにおける具体的な処理の説明を行った。データの変調方法、再生信号の位置検出、歪み補正、2次元 FIR フィルタ設計手法、閾値処理、信号品質の評価方法について示した。

第 4 章では再生信号品質の改善を目的とした 2次元 FIR フィルタの適用結果を示した。ここで採用した設計手法及びフィルタは LMMSE, RCGA, QMMSE, Volterra equalizer である。各種法により設計したフィルタを実際の再生信号に適用することでその有効性を検証した。

第5章ではホログラムサイズの縮小による記録密度の向上を目的として、RLL符号の構成と評価を行った。RLL符号により繰り返しビットを設定することで高調波成分の発生を抑え、ホログラムサイズを縮小できることを明らかにするとともに、具体的な符号化効率や実効的な記録密度を評価した。

6.2 今後の展望

ストレージにおいて信号処理は基盤技術の一つである。特にホログラフィックデータストレージでは、信号を時間的に変調する従来の方式とは違い、情報を2次元的に記録・再生するために必要な空間的な変調方法が必要となる。また、再生信号の品質向上のためには画像の位置検出、歪み補正、2次元の等化処理等、多くの信号処理技術が必要となる。これらの処理は従来の1次元的な信号処理と比較して、演算量が非常に多くなる。そのため、今後の研究ではこれらの処理の高速化を目指すとともに、ハードウェア化を視野に入れたアルゴリズムの並列化など、信号処理技術の高度化に取り組む必要がある。

謝辞

本研究をまとめるのにあたり，終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました東京理科大学基礎工学研究科電子応用工学専攻山本学教授に心より御礼申し上げます．また，副査にあたって懇篤なるご指導を頂くとともに種々のご高配を賜りました東京理科大学基礎工学研究科電子応用工学専攻伊丹誠教授，相川直幸教授，佐竹信一教授，理工学部電気工学専攻松田一郎教授に深甚なる感謝の意を表します．

本研究を進めるのにあたり山本研究室の皆様には多大なご協力を頂き，ここに謹んで感謝の意を表します．とくに吉田 周平 助教，堀内 秀真さんには共同で論文を発表するのにあたって大変お世話になりました．厚く御礼申し上げます．

最後に，本論文をまとめるのにあたり，終始励まし支えてくれた両親と多くの友人にこの場を借りて感謝します．

発表論文リスト

論文

- [1] **Yosuke Takahata**, Yo Kondo, Shuhei Yoshida, and Manabu Yamamoto, “Signal quality improvement of holographic data storage using adaptive two-dimensional filter,” *Opt. Rev.* **17**, 204-209 (2010).
- [2] Shuhei Yoshida, **Yosuke Takahata**, Shuma Horiuchi, and Manabu Yamamoto, “Diffraction model of peristrophic multiplexing with spherical reference wave,” *Journal of the Optical Society of America A* **32**, 224-227 (2015).
- [3] Shuhei Yoshida, **Yosuke Takahata**, Shuma Horiuchi, Manabu Yamamoto, “Spatial run-length limited code for reduction of hologram size in holographic data storage”, *Optics Communications* **358**, 103-107 (2016).

国際会議

- [1] Yasuhiro Ohuchi, **Yosuke Takahata**, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, “Phase code multiplexed ROM type holographic memory using the computer generated hologram,” *Holography: Advances and Modern Trends, Proc. SPIE 7358 (73581E)*, Prague, Apr. 2009.
- [2] **Yosuke Takahata**, Yo Kondo, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, “Designs of Two-Dimensional FIR Filter with RCGA and LMMSE for Holographic Data Storage,” *International Workshop on Holographic Memories & Display 2009 3P-2*, Tokyo, Dec. 2009.
- [3] **Yosuke Takahata**, Yo Kondo, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, “Designs of Two-Dimensional FIR Filter with RCGA and LMMSE for Holographic Data Storage”, *Eighth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering 2009*, Tokyo, Sep. 2009.
- [4] Naruki Yoshida, Kensuke Akieda, Akihito Nakajima, **Yosuke Takahata**, Manabu Yamamoto, “Experimental study on the influence of wavefront aberration for holographic data storage,” *Practical Holography XXIV: Materials and Applications, Proc SPIE 7619 (76190W)*, San Francisco, Jan. 2010.
- [5] Yo Kondo, **Yosuke Takahata**, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, “Signal Quality Improvement of Holographic Data Storage by Adaptive Two-Dimensional Filter,” *Optical Data Storage, Proc. SPIE 7730 (77301H)*, Boulder, May 2010.
- [6] **Yosuke Takahata**, Yo Kondo, Shuhei Yoshida, Manabu Yamamoto, “Signal quality improvement of holographic data storage by adaptive two-dimensional filter,” *Photonics Asia, Proc. SPIE 7851 (78511B)*, Beijing, China, Oct. 2010.

- [7] Yo Kondo, Yosuke Takahata, Yasuyuki Yamagishi, Manabu Yamamoto, “Two-dimensional signal processing for holographic data storage,” International Workshop on Holographic Memory and Display 2010 15P-17, pp. 59-60, Tokyo, Nov. 2010.

研究会

- [1] 高畑洋介, 佐々雄一郎, 梶原雄太, 山本学, 「媒体収縮・光学系収差による画像歪みとビット誤り特性」, 磁気記録・情報ストレージ研究会 MR2008-38, 松山市愛媛大学, 2008年12月
- [2] 高畑洋介, 近藤陽, 吉田周平, 山本学, 「適応型2次元フィルタによるHDSの信号品質の改善」, 電子部品・材料研究会 CPM2009-86, 港区機械振興会館, 2009年9月
- [3] 近藤陽, 高畑洋介, 吉田周平, 山本学, 「2次元変調符号におけるビット誤り率特性とFIRフィルタによる改善効果」, 磁気記録・情報ストレージ研究会 MR2009-48, 松山市愛媛大学, 2009年12月
- [4] 近藤陽, 山岸泰之, 高畑洋介, 山本学, 「ホログラムメモリのビット間干渉と2次元信号処理適用の効果」, 電子部品材料研究会 CPM2010-79, 港区機械振興会館, 2010年9月

全国大会

- [1] 高畑洋介, 佐々雄一郎, 梶原雄太, 山本学, 「局所的な画像歪補正に基づくデータ検出特性の改善」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-7-7, 川崎市明治大学, 2008年9月
- [2] 近藤陽, 高畑洋介, 吉田周平, 山本学, 「2次元FIRフィルタの設計におけるRCGAとLMMSEの比較」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-7-5, 新潟, 2009年9月
- [3] 近藤陽, 高畑洋介, 吉田周平, 山本学, 「ホログラムメモリにおけるサブページ単位のFIRフィルタ処理」, 電子情報通信学会全国大会 C-7-7, 仙台市東北大学, 2010年3月
- [4] 山岸泰之, 近藤陽, 高畑洋介, 山本学, 「2次元FIRフィルタの係数最適化に関する考察」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-7-7, 堺市大阪府立大, 2010年9月
- [5] 近藤陽, 山岸泰之, 高畑洋介, 山本学, 「ホログラフィックデータストレージにおけるモルフォロジーフィルタの一検討」, 電子情報通信学会全国大会 CS-3-5, 東京都市大学, 2011年3月