千田 正勝\*1, 染谷 尚紀\*2, 工藤 聡\*3

Error Block Analyses and Decoding Method Investigations

in Two-Dimensional Recording Code

### Masakatsu SENDA, Naoki SOMEYA and Satoshi KUDOH

This study reports on error-block analyses and decoding method in the 4/9 two-dimensional recording code for holographic memories. The algorithm for zero-value determination of pixel levels was changed for improving bit error rate (BER) characteristics. In the algorithm, a block was determined to be the (0000) code block when all the four pixels, at which bright spots could be reproduced, exhibited lower levels than the threshold. In the numerical aperture (NA) of 0.14, a W-shaped deterioration in BER at threshold of ~20% was disappeared. However, this method was not useful for reproduction in NA = 0.07, where errors occurred because of displacements of reproduced bright spots by optical interference between the spots.

KEYWORDS: two-dimensional recording code, hologram, bit error rate, decoding

## 1. まえがき

ホログラムメモリは体積記録・多重記録による 高記録密度性、二次元一括処理による高転送速度 性を特徴とする。半導体メモリ、磁気記録、光記 録が、各々、微細加工・集積化の限界、熱揺らぎ による媒体磁化の消失、樹脂の紫外線吸収に伴う 短波長化の限界により、高記録密度化の限界に達 しつつあるなか、ホログラムメモリは上記特徴に より、三次元記録等と並び従来メモリに代わる情 報記録技術の有力候補とされ、次世代大容量デー タストレージシステムへの適用が期待されている <sup>1,2)</sup>。120mm 径光ディスクである CD、DVD、BD の記録容量が片面単層で各々~1GB、~5GB、~25GB であるのに対し、ホログラムメモリは同サイズに て TB を超えるポテンシャルを持つ<sup>2)</sup>。ホログラ ムメモリで用いる物理的データは二次元の光信号、 すなわち二次元画像であり、論理的データは二次 元画像との間でエンコード/デコード処理される。 このためホログラムメモリでは、高効率、高耐性 な二次元記録符号の実現が求められる。記録符号 としては、位置合せ機構を不要とし歪や変形に対 応可能なオーバサンプリング符号の1つである

<sup>\*1</sup> 電気電子創造工学科(Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: senda@oyama-ct.ac.jp

<sup>\*2</sup> 電気情報工学科平成 26 年 3 月卒業

<sup>\*3</sup> 電気情報工学科平成 25 年 3 月卒業

4/9 符号が、高符号化率を有する符号として有望 視されている<sup>3,4</sup>)。ビット誤り率(BER)の閾値特性 において、BER~0(<10<sup>4</sup>)となる閾値範囲は広いこ とが望ましい。しかし、従来のデコード法では、 4/9符号でのBER特性にW型の悪化が現れ上記閾 値範囲を狭くする、いずれの閾値においても BER~0が実現しない等といった問題があった。本 論では、本特性における各領域でのエラー状態を 分析するとともに、デコード法の見直しを図り、 上記閾値特性の改善を試みた。

### 2. 動作原理および実験方法

ホログラムメモリを記録再生の違いで分類す ると、(i)ユーザ記録を可能とする記録型と、(ii)媒 体作製時にデータを記録する読出し専用(ROM)型 5-7)の2つに分けられる。(i)では通常、論理的デー タからエンコードされた二次元画像データ(基画 像データ)を空間光変調器(SLM)に表示し、SLMか らの物体光と別途照射する参照光を干渉させ、ホ ログラムを干渉縞として光学材料媒体中に記録す る。物体光と参照光との干渉条件を変えることで 媒体中の同一空間に複数のデータを体積・多重記 録できる。また再生工程では参照光を媒体に照射 し、再生光をホログラムによる回折光として取得 する。記録時と同条件の参照光を用いることで、 多重化された複数データの中から所望のデータの みを選択的に再生できる。磁気記録、光記録では データは媒体表面に局所的にビット単位で記録さ れるのに対し、ホログラムメモリでは媒体内部に 多重化され、また媒体空間の広範囲に渡り分散記 録されるのが特徴である。多重化方式としては角 度多重法、シフト多重法、およびこれらの派生方 式が提案されている<sup>2)</sup>。一方、(ii)では所望の再生 像を結像すべきホログラムを基画像データから逆 計算により求め、微細加工技術を用いて媒体中に 人工的に加工形成することで記録を行う。これは 計算機生成ホログラム(CGH)と呼ばれる。計算に は通常後述する回折積分が用いられる。(i)、(ii)と も、再生光は二次元撮像素子でキャプチャされ、 A/D 変換の後デコード処理によりデータ復元され る。

ホログラムメモリでは二次元画像を物理的デ ータとして扱うため、記録符号としては二次元符 号が用いられる。最も簡単なものは1ピクセル(px)



図1 各種ピクセルマッチ符号

が白(明)か黒(暗)かの1bitを表す1/1(=1bit/1px)符号 である(図 1(a))。符号化率(n)は 1/1=1.0 となる。但 し、通常物理量は連続的であり明/暗の判定が困難 な場合がある。これを改善したものが隣り合う 2px の内どちらがより明るいか、すなわち 2px で 1bit を表す 1/2 符号である(図 1(b))。n は 1/2=0.5 に低下する。またこれを二次元対称とし、縦横 2×2pxの内どのpxが最も明るいかで2bitを表した ものが 2/4 符号(ŋ=2/4=0.5)である(図 1(c))。これら は再生像の全ての再生輝点が二次元撮像素子の画 素上にぴったりと一致して結像することを前提と しており、ピクセルマッチ符号と呼ばれる。ピク セルマッチ符号は高nで且つデコード処理が容易 といった利点があるものの、これを実現するには 再生像を撮像素子上で並進、回転させるための位 置合せ機構が必要であり、システムが複雑となっ て望ましくない。またこのような位置合わせ機構 をもってしても再生像の歪・変形には対応ができ ないため、ピクセルマッチ符号は現実的ではない。 ピクセルマッチを断念し(非ピクセルマッチ)、複 数画素で1再生輝点のキャプチャを担当させたも のがオーバサンプリング符号である。図2に2×2px による2倍オーバサンプリングを説明する。図で は再生輝点中心は撮像画素中心から左へん上へ多 だけ並進移動し、また光の回折限界により拡がり を持ち複数画素にまたがって再生している。ここ でt, s (=0.0~1.0)は画素ピッチ(p)で最大値 1.0 に規 格化した輝点の位置ズレを表すパラメータである。 輝点強度(I)は t, s および輝点中心を囲む最近接 4 画素の画素レベル P<sub>ii</sub> (i,j=0,1) を用い線形補間:  $P_{00}ts + P_{01}(1-t)s + P_{10}t(1-s) + P_{11}(1-t)(1-s)$ により求め られる。一般に1, s は各輝点に固有となる。各輝 点のt,sはデータ画像中に埋め込んだ位置マーカ 座標間を等分割する線形歪補正法により見積もら れる<sup>8,9)</sup>。図3にオーバサンプリング符号の1つで ある 2/16 符号<sup>10)</sup>を示す。4×4px で1ブロックを成



図4 4/9 符号

し、図1(c)の2/4符号同様、4箇所の内どこが最も 明るいかで 2bit を表現する(n=2/16=0.125)。図では 1px のみ明るく描かれているが、実際は図2のよ うに各輝点は4 画素でキャプチャされる。2/16 符 号ではηが 0.125 に低下するため記録密度の減少 を招く。図4の4/9符号はオーバサンプリング符 号において高n(=4/9=0.44)化を図った符号である。 1 符号ブロック 3×3px の左上 2×2px の明暗の組合 せで(0000)から(1111)の4bitを表す。標本化定理か らすると 2/16 符号が高密度の上限となるため、4/9 符号では上記符号のようなどこが最も明るいかと いった最尤復号はもはや使えない。4/9 符号のデ コードには、ブロック毎に再生像に対する輝点強 度 I(i=0,1,2,3)とテンプレートに対する強度 Ii(i= 0,1,2,3)との類似度( $S_{code} = [\sum [I_i - I_i]^2]^{1/2}$ )を比較する テンプレートマッチ法が用いられる。なお、媒体 および撮像素子の光飽和を回避するには輝点密度 の低減が有効であるが、本研究ではこの影響につ いては考慮していない。媒体の光飽和回避法とし ては、デフォーカス記録等が用いられる。

本研究では、ホログラムメモリの記録再生工程 を計算機シミュレーションで追従する。計算には 波動光学における回折積分を用いた。これは波面 u1から波面u2への光伝搬において、u2はu1上の全 ての点からの光の総和で構成されるという考えに 基づく。ここでu1、u2は振幅と位相成分を持つ波 面関数で表される。このようなu1とu2の関係は畳 込み演算: u2=gs\*u1 で記述される。ここでgsは光伝 搬関数であり、球面波関数:  $(A/r) \exp[i(2\pi/(\lambda/n))r]$ を 用いる(A: 定数、r: 各波面上の 2 点間の距離、 i=(-1)<sup>1/2</sup>、λ: 光の波長、n: 波面間の空間における 屈折率)<sup>11)</sup>。 *1*=660nm、簡単のため全空間で n=1.0 とし、空間が複数領域に分かれる場合は多段計算 を行った。各関数は離散関数として扱われ、高速 演算処理のため、高速フーリエ変換(FFT)および波 数空間演算を用いた。この際、各関数は巡回関数 とみなされ実際の関数との違いが誤差(巡回関数 化雑音: CF 雑音)を生む。これを回避するため、基 画像データの周辺をゼロ値で埋め、波面関数デー タ数を縦横2倍とするゼロパディング(ZP)法を用 いた<sup>12,13)</sup>。なお、本研究では上記計算法をシミュ レーションに利用したが、本法は本来前述のよう に CGH においてはホログラムを設計・形成する ための実践的ツールでもある。基画像、再生像、 撮像素子の画素ピッチはいずれも 6.7µm(=p)、波 面計算点は 2048×2048pt とし、画素を 5×5 分割 (1.34µm/pt)する5倍密計算、画素レベルはこれら 分割点でのレベルの総和とした。デコード性能は t,sを予め既知とする条件で、位置検出とは独立に 評価した。全輝点に対し1は0.0~1.0、sは0.0に設 定した。回転、歪はこれらが小さい場合、並進と 近似できるため、本研究では擾乱として並進擾乱 のみを与え評価した。ブロック数は 68×68、符号 用テンプレートには各単独ブロックからの孤立再 生像を利用した。高開口数(NA)値には0.14を、低 NA値には0.07を選定した。

#### 3. 検討結果と考察

本波面解析では、高速演算処理のため各関数を 巡回関数として扱う。これにより計算結果に CF 雑音が入り込み、これがエラーを引き起こすおそ れがある。まず ZP 演算による CF 雑音の除去がう まく機能しているかを、NA=0.07~0.14 付近におけ るピーク信号対雑音比(PSNR)を線形演算による 結果と比較することで評価した。ここで線形演算



図5 PSNR-NA 特性



図6 BER-閾値特性(4/9, NA=0.14, デコード法A)

は前述畳込み演算を実空間のみで行う計算を指す。 また、PSNR[dB]は、20×log<sub>10</sub>[255/< $\sigma$ >]で定義さ れる。< $\sigma$ >は{ $\Sigma_j\Sigma_i(P_{0ij} - P_{rij})^2/(N \times N)$ }<sup>1/2</sup>であり1 画素当たりの平均二乗誤差、 $P_{0ij}$ は基画像の各 画素の輝度、 $P_{rij}$ は再生像の各画素の輝度、  $N \times N$ は画素数である。サンプル画像には画素サ イズ 128×128px、画素ピッチ 0.5µm、8bit グレイ 階調の"fruits"を使用した<sup>13</sup>。結果を図 5 に示す。 ZP 演算結果は線形演算結果と一致し、本計算では CF 雑音は除去されていることが確認できる。

図 6 に 4/9 符号(NA=0.14)における BER の閾値 特性を示す。実際の再生像には、再生輝点に直接 対応しない不要明点が多数出現しエラーの原因と なる。閾値はこれを除去するためにデコード処理 に導入したパラメータである。これまでは「符号 再生像、テンプレート共に、各画素の画素レベル が閾値より低い場合、その画素レベルを0値と判 定する」手法を採った。画素レベルの0値化に関 しこのようなアルゴリズムを用いる手法を以下デ コード法Aとする。閾値=0%ではBER~<10-1とな るが、これは(0000)以外は正判定、(0000)のみが誤 判定された結果(BER=1/16=6.3×10<sup>-2</sup>)として、一方、 閾値=100%では BER~1.0 となるが、これは(0000) のみ正判定、(0000)以外は誤判定された結果 (BER=15/16=9.4×10<sup>-1</sup>)として解釈される。BERは 閾値 0~数%(領域①)で急減、40%弱以上(領域③)



図7 再生ブロックと画素レベル

で急増する。BER~0となる範囲は広いことが望ま れるが、数%~40%弱(領域②)内の~20%周辺でBER が悪化するW型の特性となる。これは符号再生像 とテンプレートとで実際には各画素レベルが微妙 に異なることが原因と考えられる。図7にこれを 説明する。(a)は(1001)パターンに対する符号再生 像とテンプレートである。両者の各画素レベルは 図のように若干異なる。特に中央の画素に着目す ると、符号再生像ではテンプレートに比較し相対 的に暗いことが解る。(b)の例では、各々右側の画 素は符号再生像ではレベルが閾値より低いため 0 に、またテンプレートでは閾値より高いため≠0 に見なされ、両者に差異が生じる。以下本研究で は、上記領域②での BER 特性改善のため、従来デ コード法(デコード法 A)における画素レベルの 0 値判定のアルゴリズム見直しを図る。また、①~ ③各領域でのエラー状態の分析を行う。

領域②での BER 悪化は、符号再生像とテンプレ ートの画素レベルの差異によって生じる。そこで、 符号再生像のみの情報から画素レベルの0値判定 を行うようデコードアルゴリズムの変更を図る。 すなわち、「(0000)については、符号再生像におい て、各ブロックの輝点中心が位置する4 画素のみ に着目し、4画素レベルが全て閾値より低い場合、 そのブロックを(0000)と判定する」。以下これをデ コード法Bとする。なお、(0000)以外については、 デコード法Aと同様、テンプレートとの類似度比 較により判定を行う。図8にデコード法Bによる BER の閾値特性(NA=0.14)を示す。領域②におけ る BER 悪化を改善できていることが解る。次に図 8 の①~③各領域におけるエラーパターンの分析 を行った。領域①では全てのエラーが[正:(0000) →誤:(0000)以外]型であった。これに対するエラー 分析例を表1(a)に示す。閾値を3%とした場合の結 果である。また領域③では逆に全てが[正:(0000) 以外→誤:(0000)]型で生じていた(表 1(b)、閾値 =60%の例)。このことから解釈される各領域での



図8 BER-閾値特性(4/9, NA=0.14, デコード法B)

表1 エラー分析例







画素レベル状態を図9に示す。ハッチ部は本来0、 白部は本来≠0の画素を表す。領域①(図9(a))では 閾値が全ての0画素レベルを超えるまでは(0000) は他のパターンに誤判定される([正:(0000)→ 誤:(0000)以外]型)。また領域③(図9(d))では≠0の 画素レベルを閾値が超えてしまい(0000)以外も (0000)と見なされてしまう([正:(0000)以外→ 誤:(0000)]型)。領域②(図9(b), (c))では(0000)は (0000)に、(0000)以外は(0000)以外に判定され且つ 類似度比較により各パターンに正判定されるため エラーゼロとなる。このようにデコード法Bによ れば、0値判定、類似度比較ともに正判定が実現 すると解釈される。



次に再生条件を変え、デコード法の違いによる BER 特性を評価した。図 10 に 4/9 符号において低 NA(=0.07)とした場合の結果を示す。低NA 再生は デフォーカス耐性を強化する上で望まれる条件で ある。図 10 よりデコード法 B によっても輝点中 心が画素境界にある場合(t=0.2~0.8)には BER の改 善は見られない。エラー分析の結果、領域①、③ は上述と同様、また領域②でのエラーは全て [(0000)以外→別の(0000)以外]型であった。閾値 =9%での状態に着目するとエラーが起きている組 合せは(1111)→(1110)、(1110)→(1100)、(1011)→  $(1010), (1000) \rightarrow (1100), (1011) \rightarrow (1001), (0010) \rightarrow$ (0011)、(1011)→(1111)の7通りであった。これら について図4を参照すると横隣の輝点強度算出誤 りに起因するエラーと解釈され、これは横方向擾 乱1を与えたことと整合する。なお、閾値は(0000) の誤判定回避の役割を有するが、前述のようにこ の領域ではエラーは[(0000)以外→別の(0000)以外] 型であり(0000)に関するエラーは発生していない ことから、(0000)誤判定回避に関しては成功して いることが解る。図11に =0.4 での再生像中のエ ラーブロック分布(デコード法A適用)のマップを 示す。エラーブロックを白く表示している。閾値 =3、9、20%のいずれにおいてもエラーブロックは ほぼ均一に分布しており、再生像中でエラー発生 の場所依存性は無いことが確認される。図 12 に ▶=0.4 での再生像中の具体的なエラーブロック例 を示す。(a)は(1110)→(1100)、(b)は(1000)→(1100) の例である。共に NA ≥0.09 では目視によっても 正判定がほぼ可能である。(a)では NA=0.07 におい



図12 エラーブロック

ても目視にて(1110)との判定が可能であり、この 種のエラーに関してはデコード法の工夫により改 善の余地があると言える。一方(b)における NA= 0.07 では、再生像の状態で Pij値に異常が発生して いることが解る。デコードに利用できる情報はPi と(t, s)のみであり、(b)の場合にはデコードアルゴ リズムの改良によっても改善は難しいと思われる。 上述エラーブロックの中には実際には(b)のよう なタイプが多数存在する。4/9 符号では線形補間 時に近接する再生輝点間で画素レベルを共有する。 低 NA 再生では輝点サイズが大きくなり、また輝 点中心が画素境界に位置すると画素レベルの共有 はより顕著となる。4/9 符号ではこのように画素 レベルの共有に由来する輝点間干渉が大きく、テ ンプレートに対し画素レベルの僅かな違いが輝点 強度の算出時に大きな差異となって働き、これが エラーの一因となることが推測される。但し、(b) では再生輝点位置がズレを起こしており、これは 光学的輝点干渉によるものである。(b)においては これがエラーの主原因であると考えられる。上記 より(b)のエラーに対しては、デコード法Bは有効 ではない。

# 4. まとめ

ホログラムメモリ用高符号化率二次元記録符 号である 4/9 符号の BER 特性改善を目的に、エラ ーブロック分析およびデコード法の見直しを試み た。画素レベルの 0 値判定アルゴリズムとして、 符号再生像において、各ブロックの輝点中心が位 置する 4 画素のレベルから判定する方法に変更す ることで、NA=0.14 再生では閾値~20%付近に現れ る W 型の BER 悪化を消失させることができた。 但し、NA=0.07 再生での光学的な輝点間干渉によ る再生輝点位置ズレが原因で発生するエラーに対 しては、本法は有効ではないことが解った。 参考文献

- J. Ashley, M. P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Mcfarlane, R. M. Shelby and G. T. Sincerbox : Holographic Data Storage, IBM J. Res. Dev. Vol. 44, pp. 341-366 (2000)
- 2) 山本学:ホログラム記録の現状と実用化への道,映像 情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 6, pp. 726-729 (2007)
- M. Endo, M. Ueno and T. Tanabe : Data Decoding Method and Data Decoding Apparatus, Japan laid-open disclosure public patent bulletin No. JP 2004-348378A (2004)
- M. Senda : Tolerance for Translation Disturbances of Template-Matching Two-Dimensional Modulation Code for Holographic Memories, Optical Engineering, Vol. 49, No. 8, 0858031-08580311 (2010)
- 5) S. Yagi, T. Imai, A. Tate, M. Hikita, S. Tomaru, S. Imamura, T. Tamamura, Y. Kurokawa and M. Yamamoto : Multilayered Waveguide Holographic Memory Card, presented at the Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage '99, Koloa, Kauai, Hawaii, pp. 11-15 July (1999)
- T. Mitasaki and M. Senda : Write-Once Recording for Multilayered Optical Waveguide-Type Holographic Cards, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 3, pp. 659-663 (2006)
- M. Senda and Y. Aoki : Identification Data Reproduction in Multilayered Optical Waveguide-type Holographic Memory Cards, Applied Optics, Vol. 47, No. 21, pp. 3973-3979 (2008)
- 8) T. Motoyama, Y. Sugiyama, N. Ooue, M. Yamamoto, M. Endo, and T. Tanabe : High-speed data position detection method using template matching for hologram memory, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, pp. 4216-4220 (2004)
- 9) 千田正勝, 尾林良祐, 福島庄太郎:二次元記録符号に おける撮像 A/D 変換および媒体ホログラムの低階調化, 小山高専研究紀要, Vol. 46, pp. 77-82 (2013)
- M. Endo, Y. Kurokawa, M. Ueno, T. Tanabe, and M. Yamamoto : Two-dimensional modulation code for multilayered waveguide holographic memory, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp. 1846-1850 (2002)
- 11) 辻内順平:ホログラフィー, pp. 10-15, 裳華房 (1997)
- M. Ueno, Y. Kurokawa, T. Tanabe and M. Yamamoto : Fast Method of Computing Fresnel Diffraction Patterns, Proc. SPIE, Vol. 4225, pp. 96-101 (2001)
- 13) 千田正勝,福田純希,海原洋介:計算機ホログラムに おける巡回関数化雑音とサブサンプリングの検討,小山 高専研究紀要, Vol. 45, pp. 85-90 (2012)

【受理年月日 2014年 6月13日】