

計算機ホログラムのメモリ応用における ゴーストノイズとビット誤り率解析

千田 正勝^{*1}, 黒澤 知之^{*2}, 水島 宏紀^{*2}

Analyses of Ghost Noise and Bit Error Rate in Memory using Computer-generated Hologram

Masakatsu SENDA, Tomoyuki KUROSAWA and Hiroki MIZUSHIMA

This study reports on computational analyses of ghost noise and bit error rate (BER) in memory using computer-generated hologram. The sampling periodicity (d_s) can bring the ghost noise both in the telecentric (T) and lensless (L) optical systems, and the noise is avoided when $d_s < \lambda$ (λ : wavelength of light) or when lights by the d_s are diffracted to outside of the image region. The code periodicity (d_c) brings no ghost in the T or L system, but banded brightness unevenness noise is inevitably caused by diffracted images overlapped on hologram in the L system for the codes in this study. However, the BER characteristics in the L system are confirmed to be comparable with those in the T system. The L system makes the memory system simple, so it would be useful for the holographic memory if it is robust also for other disturbances.

KEYWORDS : holographic memory, computer-generated hologram, ghost noise, bit error rate

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し、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^{1,2)}。ホログラムメモリには、媒体への情報記録に光の干渉を利用する記録型¹⁾、および計算機ホログラム(computer-generated hologram(CGH): 計算と微細加工)によって媒体を作製する読出し専用(ROM)型³⁻⁶⁾がある。通常、記録型での記録再生光学系には、レンズを

用いた 4f 光学系が用いられる。本論で対象とする ROM 型においてもレンズを用いたテレセントリック光学(T)系が使われ、これは 4f 系と等価である。一方、CGH によれば任意の波面生成が可能のため ROM 型のレンズレス化(レンズレス光学系:L 系)が期待され、これはシステムの簡易化につながる。CGH に特有の特徴として基画像、各波面が標本化周期を持つ点が挙げられ、さらにメモリ応用では基画像は符号周期を有する。これら周期性はラマンナス回折を引き起こし、ゴーストノイズ発生の原因となり得る。ここでゴーストとは、再生像に再生像の複製が位置をずらし重畳して現

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

*2 電気情報工学科平成 27 年 3 月卒業

れる現象である。ノイズによっては発生条件が光学系に依存するため、ゴーストノイズに関してもL系ではT系に比較しより顕著に画質、ビット誤り率(BER)に悪影響を及ぼすことが懸念される。本論では、ROM型ホログラムメモリにおけるL系適用可能性の検証を目的に、まずT、L両光学系におけるゴーストノイズ発生のメカニズムおよび回避条件の解析を、次いで両光学系におけるBER、画質の比較評価を計算実験により行った。

2. 検討内容および実験方法

図1に(a)T系、(b)L系に対する本実験での計算モデルを示す。T系では焦点距離 f を有する2つのレンズを介し基画像面と再生像面が上下対称に $4 \times f$ の距離で配置される。本モデルでは両レンズの中間位置をホログラム面とする。同様にL系でも基画像面と再生像面の中間位置にホログラム面を設定する。各光学系において、各面の全体が計算領域、その中央部がデータ領域となる。また、各面での画像領域を図中白抜きで、記録再生の開口数(NA)に対応する角度を図中 θ_{NA} で示す。L系ではレンズが不要なため、T系に比較しシステムは簡易化する。基画像面からのホログラム面生成(記録過程)、およびホログラム面からの再生像面構成(再生過程)はzero-padding(ZP)処理^{4,7)}を施した波動光学解析(回折積分計算)により行った。ここでZP処理は計算領域をデータ領域の縦横2倍以上とし、各面の計算領域を計算した後、データ領域の外側をゼロ値化する処理であり、高速演算処理の過程で発生する巡回関数化雑音を取り除くために用いている。

図2に基画像とラマンナス回折を説明する。CGHでは基画像、各波面は単位計算点の集まりで構成される。計算点は物理的サイズを持ちこれが標準化周期(d_s)である。またメモリ応用に用いる符号データの場合、明点の周期は画素ピッチ(p)の整数倍となり、これが符号周期(d_c)である。図3に4/9符号^{8,9)}および4/16符号¹⁰⁾を示す。4/9符号は 3×3 画素で1ブロックを成し左上 2×2 画素の明暗組合せにより、また4/16符号は 4×4 画素で1ブロックを成し左上 3×3 画素の明暗組合せにより、各々1ブロック当り(0000)~(1111)の4bitを表現する。これらの符号は再生輝点の位置ズレ、拡がりに対応するため撮像素子複数画素を用いて1再生

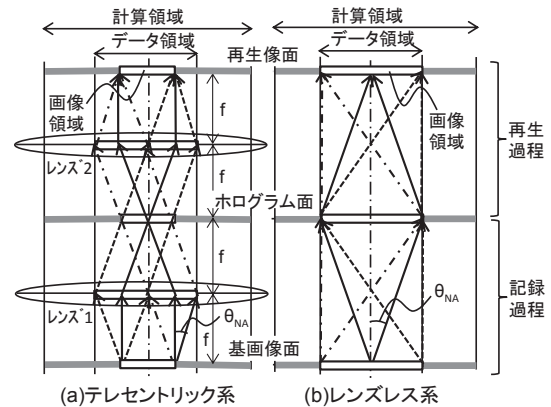


図1 記録再生光学系(計算モデル)

輝点の検出を行うオーバーサンプリング、および高符号化率を実現するためテンプレートとの類似度比較によりデコード処理するテンプレートマッチ復号を特徴とする^{9,11)}。図3より4/9符号では $d_c=3p$ 、4/16符号では $d_c=2p$ となる。ラマンナス回折は光波長(λ)に対し散乱因子サイズが $\ll \lambda$ である場合の回折現象であり、図2(b)に対し回折条件は、

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

となる。ここで d は d_s 、 d_c などの周期、 n は次数を表す整数、また本検討では $\lambda=0.66\mu\text{m}$ とした。CGHでは基画像、各波面は有限の d_s を持ち、さらに符号データの場合基画像は d_c を持つため、これらはラマンナス回折を引き起こし、その回折像が再生像に混入・重畳するとゴーストとなる。

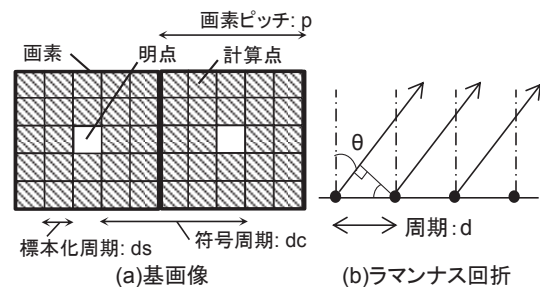


図2 基画像とラマンナス回折

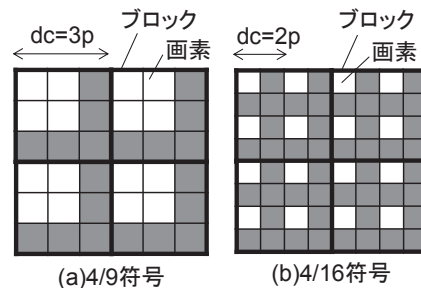


図3 4/9符号と4/16符号

3. 検討結果と考察

3. 1 標本化周期(d_s)による回折

まず d_s 回折によるゴースト発生条件について解析する。符号データの基画像では明点は周期 d_c を持ち、周期 d_s を持つのは暗点のみであるため、基画像には d_s はあらわに現れない。これに対し自然画の基画像は何らかの輝度を持つ周期 d_s の計算点で構成されるため、本検討に適す。以下ではサンプル基画像として自然画”fruits”を用い、 $NA=0.2$ ($\theta_{NA}=11.5\text{deg}$)に固定し d_s を変化させて再生像を観察した。(1)式によれば $d_s < \lambda$ 時には(1)式を満たす条件は存在せず回折は起きない(①)。 $d_s > \lambda$ 時には(1)式を満たす角度 θ_s 方向に回折光が出射し、幾何学的に考えるとこれが画像領域外に出れば回折像の混入は無し(②)、画像領域内に入れば混入有り(③)となることが推測される。図1のモデルではこれはT系では① $d_s < \lambda$ 、② $\theta_s > 3\theta_{NA}$ 、③ $\theta_s < 3\theta_{NA}$ 、L系では① $d_s < \lambda$ 、② $\theta_s > 2\theta_{NA}$ 、③ $\theta_s < 2\theta_{NA}$ に対応する。図4に各光学系において d_s 値をT系(a)①: $d_s(=0.5\mu\text{m}) < 0.66\mu\text{m}$ 、(b)②: $\theta_s(=41.3\text{deg}) > 3 \times 11.5\text{deg}$ 、(c)③: $\theta_s(=26.1\text{deg}) < 3 \times 11.5\text{deg}$ 、およびL系(a)①: $d_s(=0.5\mu\text{m}) < 0.66\mu\text{m}$ 、(b)②: $\theta_s(=26.1\text{deg}) > 2 \times 11.5\text{deg}$ 、(c)③: $\theta_s(=15.3\text{deg}) < 2 \times 11.5\text{deg}$ となるよう設定した場合の再生像を示す。(a)、(b)ではゴースト無し、(c)では有りとなり上記に従うことが解る。 d_s 回折では図1中各面から直上に0次回折光(実像)、その周辺8箇所を高次(1次等)回折光が出射され、ゴーストは再生像面においてこれら高次回折光による像(高次回折像)が実像に混入・重畳することで生じると解釈される。T系では、光学的には $>\theta_{NA}$ の回折光はレンズの機能により画像領域外へ追い出されるはずであるが、 d_s 回折の場合はこれに従わず上記のようにいずれの面からも高次回折光が出射するため、ゴースト回避には各面での回折に対し画像領域外への追い出しが必要となる。なお、図4(a)では共に画像にボケが生じている。これはこの条件で $d_s(=0.5\mu\text{m}) \ll \text{輝点サイズ}(\sim \lambda/NA=3.3\mu\text{m})$ であり、画像の空間分解能が低いためである。

CGHではホログラム設計までを計算で行うため、図1においてホログラム面の次段の波面までは計算は実際と一致する(ホログラム単位加工セルサイズ= d_s を仮定)。よって計算と実際との違いが起こり得るのは、T系でのレンズ2~再生像間である。この違いは、本来連続的な光学部品である

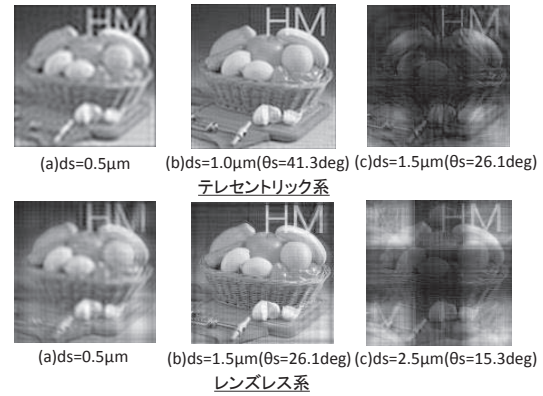


図4 再生像(自然画, NA=0.2)

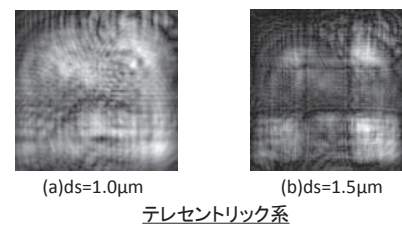


図5 レンズ2直前波面(振幅)

レンズ2を d_s を持つ離散関数で扱った点に起因する。以下では波面追跡により、上記T系でのゴースト発生に関する解析結果の検証を行う。図5にT系の(a) $d_s=1.0\mu\text{m}$ 、(b) $d_s=1.5\mu\text{m}$ でのレンズ2通過直前の波面(振幅像)を示す。ゴースト無しの $d_s=1.0\mu\text{m}$ では像の重畳は見られないが、ゴースト有りの $d_s=1.5\mu\text{m}$ では明確な像重畳が観察される。レンズ2通過直前の段階は計算と実際が一致する条件内にあることから、上記結果はレンズ2が実際の光学部品の場合にも $d_s=1.0\mu\text{m}$ ではゴーストは発生せず、一方 $d_s=1.5\mu\text{m}$ ではゴーストは発生することを示し、本節での解析結果の正当性を立証するものである。

3. 2 符号周期(d_c)による回折

次に d_c 回折について解析する。まず初めに再生像上でのゴースト発生の目視観察を容易にするため、サンプル基画像としてデータを小規模とし列の一部に欠陥を施した4/16疑似符号データ画像($d_c=2p$)を用いて検討する。 $p=6.7\mu\text{m}$ 、5倍密計算(1画素5×5分割)、 $NA=0.07$ ($\theta_{NA}=4.0\text{deg}$)とした。 $d_s=1.34\mu\text{m}$ ($\theta_s=29.5\text{deg}$)のためT系($\theta_s > 3\theta_{NA}=3 \times 4.0\text{deg}$)、L系($\theta_s > 2\theta_{NA}=2 \times 4.0\text{deg}$)共に d_s 回折光は画像領域外となり考慮不要となる。また同様の理由でレンズ2の離散関数化の影響は無視でき、これに

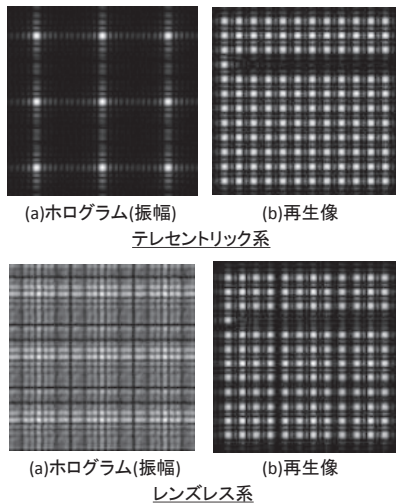


図6 ホログラムと再生像(4/16 疑似, NA=0.07)

伴う計算と実際との相違の危惧も不要となる(後述 $NA=0.14$ にても $\theta_{NA}=8.0\text{deg}$ のため同様)。図6に各光学系におけるホログラム(振幅像)と再生像を示す。各画像の外縁が $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ に相当する。この場合 d_c の1次回折光は $\theta_{c1}=2.8\text{deg}$ 、2次光は $\theta_{c2}=5.6\text{deg}$ に出射される。T系では(a)は基画像のフーリエ変換像に相当し、中央に0次回折像、その周辺8箇所 $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ 以内である1次($\theta_{c1}=2.8\text{deg}$)までの高次回折像が出現している。一方L系(a)でも同様に9つの回折像が重畳し、干渉縞模様を形成している。ここで、 d_c 回折の少なくとも1次光までは本符号データ画像にとって本質であり画像領域外へ追い出すことはできない。これは $\theta_{NA}<2.8\text{deg}$ ($=\theta_{c1}$) とすると、再生輝点サイズは $>13.5\mu\text{m}(=\lambda/\sin\theta_{NA})$ となり、本基画像の本質である $d_c(=2p=13.4\mu\text{m})$ の空間分解能および周期性を表現できなくなるためである。T系(b)ではいずれの輝点およびその周辺も同様の輝度分布を示し、また欠陥部に画像の重畳も見られない。一方L系(b)では欠陥部に画像重畳は無いものの、画像上縦横に何本かの縞状の輝度ムラが発生しており、またこの縞の位置は(a)の干渉縞模様と対応する。以上のことからL系ではゴースト自体は発生しないが、ホログラム上の d_c 回折に由来する干渉縞模様が再生像に縞状の輝度ムラノイズとして反映する、またT系ではゴースト、輝度ムラ共に発生しないと解釈される。なお、T系にて高次 d_c 回折像の重畳がノイズ発生に寄与しないのは、4f系同様レンズの機能により、これがホログラム面にて分離し、また再生像面にて実像(0次回折像)と同一位置に

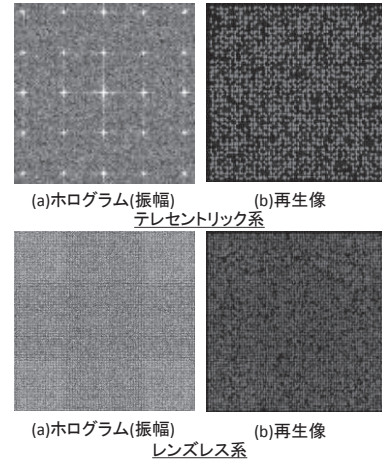


図7 ホログラムと再生像(4/9 符号, NA=0.07)

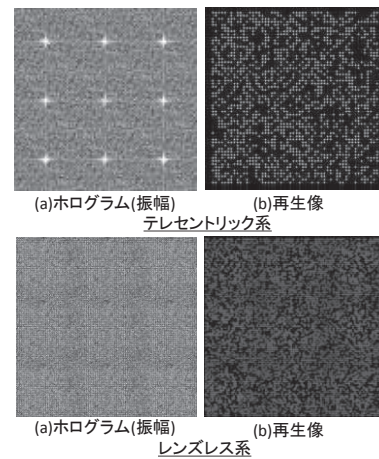


図8 ホログラムと再生像(4/16 符号, NA=0.07)

結像するためと考えられる。

次に4/9符号および4/16符号データ基画像について観察する。前述4/16疑似符号データとの違いは、データ規模が大きく(計算領域: 2048×2048)、各ブロックに対し符号パターンがランダムに配置される点である。その他、画像のスペック、記録再生条件は同様である。なお、計算モデルの違いにより、光学系によって画像サイズは異なる。図7、図8に $NA=0.07$ に対する結果を示す。各画像の外縁が $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ に相当する。4/9符号では d_c の1次回折光は $\theta_{c1}=1.9\text{deg}$ 、2次光は $\theta_{c2}=3.8\text{deg}$ 、3次光は $\theta_{c3}=5.7\text{deg}$ 、4次光は $\theta_{c4}=7.6\text{deg}$ 、5次光は $\theta_{c5}=9.5\text{deg}$ に、また4/16符号では一次光は $\theta_{c1}=2.8\text{deg}$ 、2次光は $\theta_{c2}=5.6\text{deg}$ 、3次光は $\theta_{c3}=8.5\text{deg}$ に出射される。4/9符号のホログラム面(図7、T系(a))では中央に0次回折像、その周辺に $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ 以内である2次回折像($\theta_{c2}=3.8\text{deg}$)までが、また4/16符号(図8、T系(a))では、図6のT系(a)

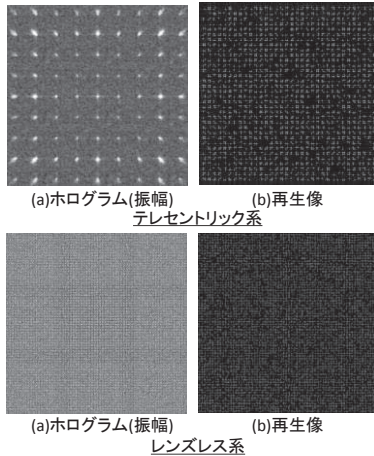


図9 ホログラムと再生像(4/9 符号, NA=0.14)

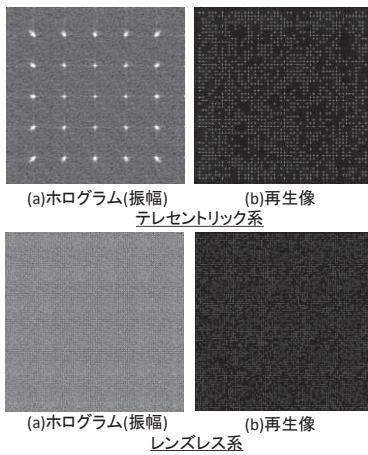


図10 ホログラムと再生像(4/16 符号, NA=0.14)

同様、1次回折像($\theta_{c1}=2.8\text{deg}$)までが出現している。T系では再生像はいずれもような輝度分布を示す。一方L系では、ホログラム上に4/9符号では大きく「十字」型、4/16符号では「井の字」型の帯状干渉模様が現れ、各々の再生像にはこれら模様と対応する位置に帯状の輝度ムラが発生している。図9、図10にNA=0.14に対する結果を示す。各画像の外縁が $\theta_{NA}(=8.0\text{deg})$ に相当する。上記NA=0.07と同様、T系ホログラム上には、4/9符号では $\theta_{NA}(=8.0\text{deg})$ 以内である4次回折像($\theta_{c4}=7.6\text{deg}$)までが、4/16符号では2次回折像($\theta_{c2}=5.6\text{deg}$)までが出現し、またL系ホログラム上には両符号共に帯状干渉模様が現れている。NA=0.14条件においてもL系のみにホログラム上の帯状干渉模様と対応する位置に輝度ムラが観察される。以上、符号データについても、T系ではゴースト、輝度ムラ共に発生せず、一方L系ではゴースト自体の発生は無いが、ホログラム上に d_c 回折に由来する帯状干渉模様が発生し、再生像にはこれ(ホログラムから

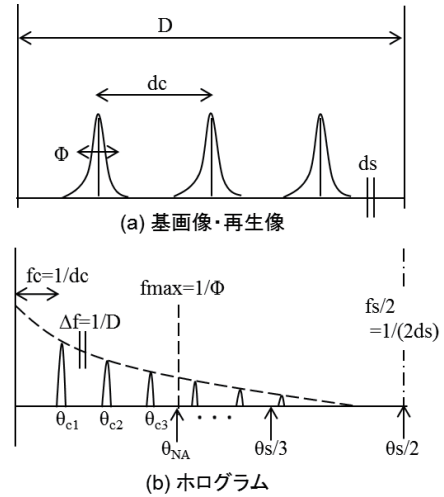


図11 基画像・再生像とホログラム

出射直後の光分布)が反映した帯状の輝度ムラノイズが発生することが解る。本論で扱っている符号条件においては前述のようにホログラムへの d_c 回折光の入射は本質であるため、L系での輝度ムラノイズの発生は不可避である。なお、上記輝度ムラはホログラム上での高次 d_c 回折像の重畳現象に由来しており、回折像の重畳という点ではゴーストと同様の原因により生じているが、通常、再生像上での像重畳をもってゴーストと定義するため、本論でも両者を別ノイズとして区別する。

図11に上述 d_s 、 d_c 回折についての基画像・再生像とホログラムとの関係を整理する。ホログラムがフーリエ変換像に対応するT系を前提とするが、角度(θ)に関してはT系、L系共通である。 D は画像サイズ(d_s の整数倍)であり、空間周波数の分解能(Δf)と $\Delta f=1/D$ の関係にある。 Φ は再生輝点サイズ($\sim \lambda/NA=\lambda/\sin\theta_{NA}$)であり、記録再生のNAによって決定する再生像が持つ最も細かい画像成分に対応する。 Φ は再生像およびホログラムが持つ空間周波数最大値(f_{max})とは $f_{max}=1/\Phi$ の関係にある。なお、基画像の場合には $f_{max}=1/(2d_s)$ である。基画像が符号周期(d_c)を持つ場合にはホログラム上に周期 $f_c=1/d_c$ に対応して高次回折像(θ_{c1} 、 θ_{c2} 、 θ_{c3} 、...)が $d_c \sin\theta_{ci}=i\lambda$ の条件で現れホログラムは上記で見たようなスポット状となる。一方 d_c を持たない自然画の場合には $d_c=D$ により $f_c=\Delta f$ となってホログラムは(b)に示す破線のようにになる。基画像、各波面が標本化周期(d_s)を持つ場合、空間周波数の周期(f_s)は $f_s=1/d_s$ となる。 f_s は d_s 回折角(θ_s : $d_s \sin\theta_s=\lambda$)に対応する。図1のモデルにおいて d_s 回折光が画像領域外となる条件 $\theta_s>2\theta_{NA}$ ($3\theta_{NA}$)は $f_s>2f_{max}$ ($3f_{max}$)

と等価であり、これは標本化定理に相当するものと解釈される。一方 d_s を持たない場合、即ち各波面が連続関数で表される場合($d_s \rightarrow 0$)には $f_s \rightarrow \infty$ となり、 d_s 回折光は画像領域外となる。但し実際には $d_s = \lambda$ の場合 $\theta_s = 90\text{deg}$ 、 $d_s < \lambda$ の場合 θ_s は存在しないため、 $d_s \leq \lambda$ となれば d_s 回折は起きなくなる。

3. 3 BER と画質評価

以下、再生像の BER を評価する。図 12 に各条件での BER の閾値特性を示す。ここで閾値はデコードアルゴリズム中 (0000) パターン判定用に用いるパラメータである^{9,11)}。 t は横方向の位置ズレパラメータであり、 $t=0.0, 1.0$ は輝点中心が撮像素子画素中心に、 $t=0.4, 0.6$ は画素境界近傍に位置することを意味する。メモリ応用ではいずれの t 値に対しても $\text{BER} \sim 0$ ($< 10^{-4}$) となる閾値範囲が存在することが要求される。4/9 符号、NA=0.07 条件では、両光学系共境界付近の t 値にて $\text{BER} \sim 0$ とならず、この要求を満たさない。L 系では $\text{BER} \sim 0$ とならない t 値範囲が T 系での 0.4-0.6 から 0.2-0.8 に拡大し、また BER 値も大きくなり、本特性における悪化が認められる。図 13 に 4/9 符号、NA=0.07 でのエラーマップを示す。 $t=0.4$ 、閾値を変化させた場合の再生像上のエラーブロックを白く表示したものである。T 系ではエラー分布はランダムであるのに対し、L 系では図 7 の「十字」型帯状輝度ムラを反映した分布となり、輝度ムラがエラーを引き起こしていることが解る。一方、図 12 の上記以外の条件では、両光学系の BER 特性はほぼ同様である。以上より、輝度ムラはエラー要因となり得るが、実効的条件範囲ではその影響は小さく、L 系での BER 特性は T 系と同等であると評価できる。

次に再生像を画質の観点で評価する。評価には次式¹²⁾で定義される信号対雑音比(SNR)を用いた。

$$\text{SNR} = (\mu_H - \mu_L) / (\sigma_H^2 + \sigma_L^2)^{1/2} \quad (2)$$

ここで μ_H, σ_H^2 は再生像における明点輝度の平均と分散、 μ_L, σ_L^2 は暗点輝度の平均と分散であり、明点、暗点各々に対する輝度ヒストグラムから求められる。表 1 に各条件での SNR 算出結果を、また図 14 に 4/16 符号、NA=0.07 条件におけるヒストグラム例を示す。表 1 では L 系にてやや低い値となる傾向があるものの、両者に大きな違いは見られない。図 14(図 8 の両光学系の再生像に対応)

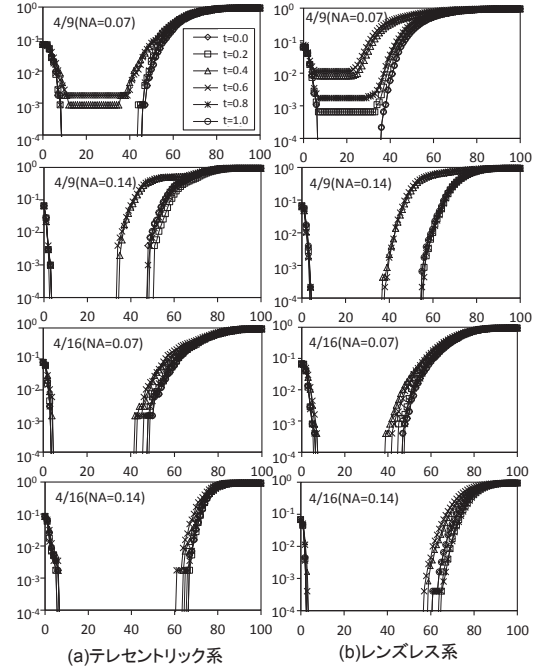


図 12 BER 閾値特性(縦: BER, 横: 閾値[%])

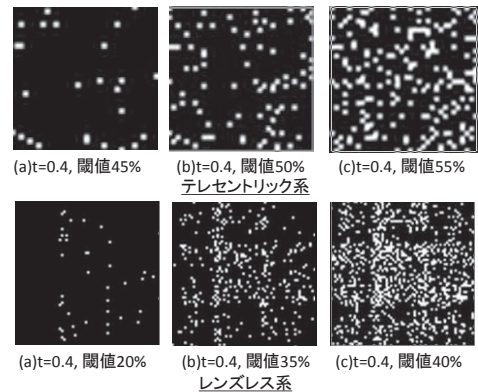


図 13 エラーマップ(4/9 符号, NA=0.07)

においても、両ヒストグラムには確かに顕著な差異はない。このように両光学系の SNR は同程度であり、SNR による統計的評価で見ると、両者の画質は同等と言える。一般にホログラムメモリにおいて SNR は BER と相関関係にあることが知られる¹²⁾。本件のように帯状輝度ムラを有しテンプレートマッチ復号による符号に対しても適合するか不明ではあるが、上記 SNR の結果は、BER の結果と一応の整合を示すものである。なお、本デコード法はブロック単位で類似度比較を行うため、低周波ノイズには堅牢であるが、高周波ノイズにはやや脆弱といった傾向を持つ。これが図 13 の L 系(a)にて輝度ムラのエッジ部にエラーが多く発生する原因と考えられる。また L 系では光学的距

表 1 再生像の SNR

		テレセントリック系	レンズレス系
4/9符号	NA=0.07	3.71	3.66
	NA=0.14	11.23	10.55
4/16符号	NA=0.07	9.02	8.21
	NA=0.14	10.09	11.64

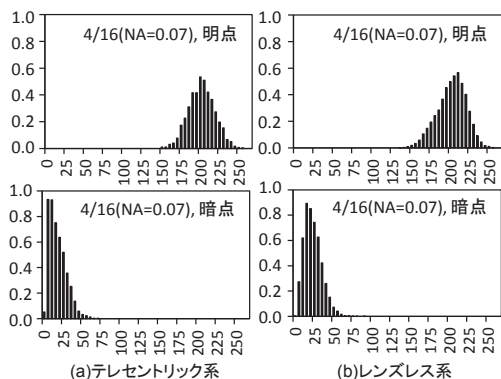


図 14 ヒストグラム(縦: 相対頻度, 横: 輝度)

離が長い像端部でエラーが生じ易いが、図 13 ではこの傾向は観察されない。これは本実験が焦点深度($\sim 1/NA^2$)が大きくなる低 NA 条件であること、輝点光軸と再生像面との斜交角が小さく輝点変形が顕著でないことが原因と考えられる。

4. まとめ

T 系、L 系でのゴースト発生メカニズムの解析および BER 特性の比較評価を行い、以下の点を明らかにした。

- (1) d_s 回折により T 系、L 系共にゴーストは発生し得る。 $d_s < \lambda$ あるいは d_s 回折光を画像領域外に追い出すことでこれは回避可能である。
- (2) d_c 回折によっては T 系、L 系共にゴーストは発生しない。但し、L 系ではホログラム上での d_c 回折像重畳に起因する帯状輝度ムラノイズが発生し、本論で扱った符号条件においてはこの発生は不可避である。
- (3) 輝度ムラノイズはエラーの要因となり得る。但し、実効的な条件範囲においてはその影響は小さく、L 系での BER 特性は T 系と同等である。

他の擾乱に対する耐性の検証が必要であるが、本検討で見る限り L 系は T 系と同等の BER 性能を有しシステムの簡易化を可能にするため、ROM 型ホログラムメモリに対する有用な光学系と言える。

参考文献

- 1) 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)
- 3) 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)
- 4) M. Ueno, Y. Kurokawa, T. Tanabe and M. Yamamoto : Fast Method of Computing Fresnel Diffraction Patterns, Proc. SPIE, Vol. 4225, pp. 96-101 (2001)
- 5) 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)
- 6) M. Senda and Y. Aoki : Identification Data Reproduction in Multilayered Optical Waveguide-type Holographic Memory Cards, Appl. Opt. Vol. 47, No. 21, pp. 3973-3979 (2008)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) M. Senda : Tolerance for Translation Disturbances of Template-matching Two-dimensional Modulation Code for Holographic Memories, Opt. Eng. Vol. 49, No. 8, 0858031-08580311 (2010)
- 10) 千田正勝, 濱崎泰輔 : 4/16 テンプレートマッチ符号の並進擾乱とデフォーカス耐性評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-7-5 (2012)
- 11) 千田正勝, 染谷尚紀, 工藤聡 : 二次元記録符号におけるエラーブロック分析とデコード法の検討, 小山高専研究紀要, Vol. 47, pp. 71-76 (2014)
- 12) X. An and D. Psaltis : Experimental Characterization of an Angle-multiplexed Holographic Memory, Opt. Lett. Vol. 20, No. 18, pp. 1913-1915 (1995)

【受理年月日 2015年 6月9日】

