

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

千田 正勝*¹, 福田 純希*², 海原 洋介*³

A Study on Cyclic Function Noise and Sub-Sampling
in Computer Generated Hologram

Masakatsu SENDA, Junki FUKUDA and Yosuke KAIHARA

This work reports influences of the cyclic function (CF) noise on reproduced image quality and bit error rate (BER), and a calculation amount reduction effect by the sub-sampling (SS) method, in the computer-generated hologram (CGH). The CF noise occurs especially at edges of the image, distorts reproduced bright spots, and causes errors. The zero-padding (ZP) method suppresses the CF noise completely, although the calculation amount increases by 4 times as compared with the cyclic calculation. The SS method is useful because it can reduce the amount by 1/4 and does little harm to BER although it deteriorates the image a little more than the ZP method.

KEYWORDS : computer-generated hologram, cyclic function noise, zero-padding, sub-sampling

1. まえがき

ホログラムの作製法としては主に、物体光と参照光による光の干渉現象を利用する方法、および計算機ホログラム(CGH : Computer Generated Hologram)法の二つが挙げられる。CGH 法は計算と微細加工技術により光学系に依らない任意のホログラム形成が可能なため有用であり、光ディスク用や光通信用光学素子等に広く利用され¹⁾、また読出し専用型ホログラムメモリ^{2,5)}への適用も期待されている。CGH 法では膨大な量の計算が必要となるため通常、波数空間演算による高速演算処理が施される。この際、

画像データや光伝播関数は巡回関数として扱われるが、実際の関数との違いが巡回関数化(CF : Cyclic Function)雑音を引き起こしエラーを招くおそれがあり、これを回避するためデータ周囲をゼロ値で埋めるゼロパディング(ZP : Zero-Padding)法が採られる⁶⁾。しかし、従来 CF 雑音の特徴は必ずしも明確になっていない。また、ホログラムメモリ用記録符号におけるビット誤り率(BER : Bit Error Rate)悪化の原因として再生輝点のアノマリ(異常)発生が指摘されているが⁷⁾、従来、CF 雑音と輝点アノマリ、BER との関係も明らかになっていない。一方、ZP 法では最低でも基画像の 4 倍の計算量が必要となり、計算量を低減する案として画像をサブサンプリング(SS : Sub-

*1 電気情報工学科(Dept. of Electrical and Computer Engineering), E-mail: senda@oyama-ct.ac.jp

*2 電気情報工学科平成 24 年 3 月卒業

*3 電気情報工学科平成 23 年 3 月卒業

Sampling)する手法が提案されている⁹⁾。しかし、SS法による画質や BER への影響は必ずしも明らかになっていない。本論では CGH 法における画質、BER の向上および計算量低減を目的に、CF 雑音などの程度画質、BER を悪化させるかの特徴分析、および SS 法の有用性について評価・検討を行ったので報告する。

2. 検討内容および実験方法

まず、線形演算、巡回演算、巡回 ZP 演算(ZP 法)と CF 雑音との関係について説明する。図 1 に線形演算と巡回演算を示す。(a)の線形演算は実空間での計算であり、光伝搬関数は例えば光の起点が画像の左端にある場合、図に示すように画像の右端まで広がった関数となる。線形演算ではこの光伝播関数と画像データとが正確に畳込み計算される一方、計算量が膨大となる。(b)の巡回演算では光伝播関数と画像データは波数空間変換される。波数空間での光伝播関数は図のように左側半分の情報しか持たないため、右側の計算をする際は左側の情報を巡回させて用いることになる。計算の高速化が図られるものの、(b)の光伝播関数は(a)とは明らかに異なるため、正確な畳込み計算はされない。これによって生ずるのが CF 雑音である。(c)の ZP 法では(b)同様光伝播関数と画像データを波数空間変換する。但し、画像データ周辺をゼロ値で埋め縦横 2 倍以上とすることで、光伝播関数を(a)と同様画像データの左端から右端まで広がった関数とする。図に見るように画像データ外側では光伝播関数を巡回させて用いるため計算は不正確となり CF 雑音が発生するが、画像データ内側では(a)と同様の光伝播関数を使用することになるため正確な畳込み計算が可能となり CF 雑音は発生しない。しかも波数空間演算を利用するため計算の高速化も図られる。

次に巡回 SS 演算(SS 法)について説明する。図 2 に ZP 法と SS 法を対比させて示す。(a)の ZP 法では、 $N \times N$ px の基画像 $u_0(N \times N)$ に対し上述のように周辺にゼロ値を追加し、縦横 2 倍の基画像 $u_{0,zp}(2N \times 2N)$ を作成する。これを波数空間変換した $U_{k,zp}(2N \times 2N)$ と、 $2N \times 2N$ px のサイズを持つ光伝搬関数を波数空間変換した $G_{k,zp}(2N \times 2N)$ とから $2N \times 2N$ px のサイズを持つホログラム $u_{h,zp}(2N \times 2N)$ を計算し、これから中央の $N \times N$ px 領域を切り出すことで最終的なホログラム $u_{h,zp}(N \times N)$

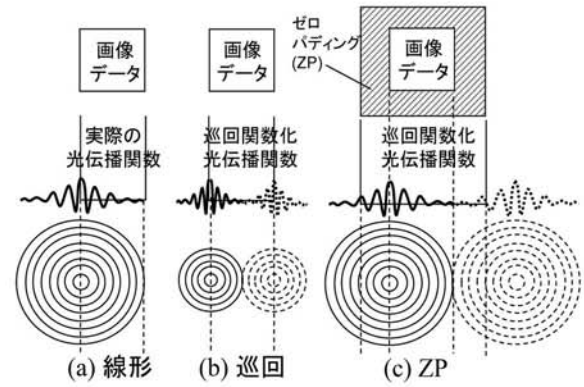


図 1 線形演算と巡回演算

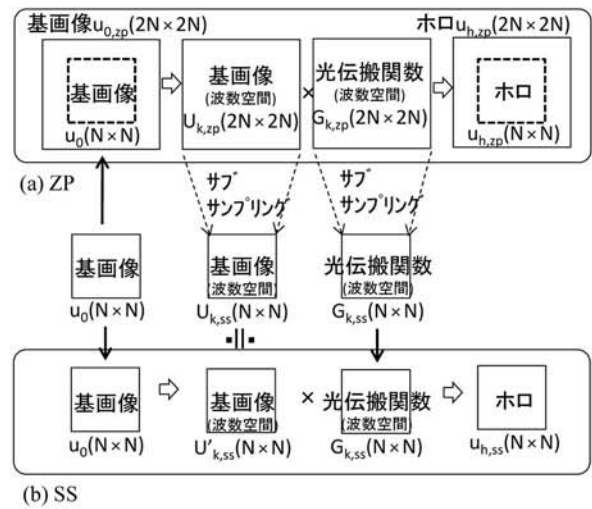


図 2 ZP 法と SS 法

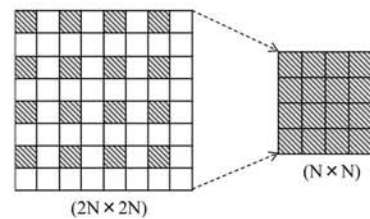


図 3 1/2 サブサンプリング

を得る。なお、本論ではホログラムから出射する直後の光の波面関数をもってホログラム関数と定義する。ZP 法では CF 雑音発生を回避でき高速演算処理も施されるが、データ量を縦横 2 倍以上とする必要があり、図 1(b)の巡回演算に比較し計算量は最低でも 4 倍となる。一方、ZP 法に対する計算量低減を図ったものが SS 法である。(b)の SS 法では、基画像には $u_0(N \times N)$ をそのまま使用し、また波数空間変換した光伝搬関数には前述

$G_{k,zp}(2N \times 2N)$ を例えば $1/2$ にサブサンプリングし $N \times N$ px のサイズにした $G_{k,ss}(N \times N)$ を近似関数として使用する。ここで $1/2$ サブサンプリングとは図 3 に示すように、 $2N \times 2N$ px のデータを波数空間上で原点を対称に縦横 1 データごとに間引きし $N \times N$ px のデータに $1/4$ 圧縮する画像処理技術である。間引きにより情報に欠落が生じるものの周波数特性はほぼ維持されるため、良い近似が期待される。なお、波数空間変換した基画像としては本来前述 $U_{k,zp}(2N \times 2N)$ を $1/2$ サブサンプリングした $U_{k,ss}(N \times N)$ を使うべきであるが、計算量を低減させるため、 $u_0(N \times N)$ を波数空間変換した $U'_{k,ss}(N \times N)$ で近似できるとしてこれを使用する。 $G_{k,ss}(N \times N)$ を得るには基データとして $G_{k,zp}(2N \times 2N)$ が必要なため、 $2N \times 2N$ データの計算が一度は必要となるが、光学系が同じなら $G_{k,ss}(N \times N)$ は使い回しが効く。 $u_0(N \times N)$ 、 $U'_{k,ss}(N \times N)$ 、 $u_{h,ss}(N \times N)$ はいずれも $N \times N$ データの計算であるため、複数の基画像に対してこれらのホログラムを得るのに、全体として各回ほぼ $N \times N$ データの計算で済むことになり、ZP 法に比較しほぼ $1/4$ の計算量低減となる。

本論では、線形演算、巡回演算、巡回 ZP 演算 (ZP 法)、巡回 SS 演算 (SS 法) の 4 つの方法でホログラムを形成し、これらからの再生像の画質、BER を比較することで、CF 雑音の特徴および SS 法の有用性を評価した。実験は C 言語プログラムによる計算実験により行い、ホログラム形成・再生過程の計算には波動光学解析を用いた。光波長は $0.66\mu\text{m}$ とした。画質評価は、自然画として画像サイズ $128 \times 128\text{px}$ 、画素ピッチ $0.5\mu\text{m}$ 、8bit グレイ階調の "fruits" を使用したピーク信号対雑音比 (PSNR) により行った。PSNR は、

$$\text{PSNR} [\text{dB}] = 20 \times \log_{10}[255 / \langle \sigma \rangle] \quad (1)$$
で定義した。ここで、 $\langle \sigma \rangle$ は、

$$\langle \sigma \rangle = \{ \sum_j \sum_i (P_{0ij} - P_{rij})^2 \}^{1/2} / (N \times N) \quad (2)$$
で表される 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である。BER 評価には後述する 4/9 記録符号^{5,7)}を用い、計算点 2048×2048 、画素ピッチ $6.7\mu\text{m}$ 、1 画素 5×5 分割の 5 倍密計算とした。図 4 に上記 4 つの演算でのホログラム形成・再生法を示す。 u_0 は基画像、 u_h はホログラム、 u_r は再生像である。再生過程については、自然画 "fruits" に対してはデータサイズが小さいため図の通り線形演算を用いたが、4/9 符号に対してはデータサイズが大き

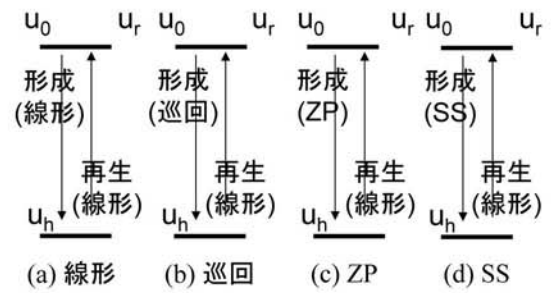


図 4 ホログラム形成・再生法

く線形演算では計算時間が膨大となり現実的ではないため ZP 法を用いて計算した。

3. 検討結果と考察

3. 1 画質評価

本節では自然画を用いた再生像画質から ZP 法、SS 法の有用性、および CF 雑音の特徴を評価する。図 5 に各演算法での自然画の再生像を示す。開口数 (NA) = 0.2 の場合の結果である。目視観察では特に画像中 "M" の文字に注目すると、(a) と (c) は同様、(b) ではボケが激しいことが解る。また (d) では全体的にやや縦横の縞模様が強く現れていることが解る。図 6 に再生像の輝度値差マップを示す。図 5 における (a) の再生像を基準とし、各再生像との各画素での輝度値の差の絶対値を抽出した図である。差の絶対値の大きさを 8bit 階調 (0~255) で表し、差が大きいほど明るい輝度 (強い白色) で表示している。実際の差の値は小さく暗過ぎるため差の値を 5 倍し表示している。図 6(a) は図 5(b) 巡回と図 5(a) 線形との差であり、画像全域で画像コンテンツのエッジに沿って大きな差異が生じていることが解る。このように巡回演算では再生像はかなり劣化したものとなる。図 1(b) の説明から CF 雑音は実際の光伝搬関数との差異が大きくなる画像端部で顕著に発生することが予想されるが、図 6(a) ではこの傾向は見られず画像全域で劣化が生じている。図 6(b) は図 5(c) ZP と図 5(a) 線形との輝度値差マップである。差は画像全体で完全にゼロであり、線形演算と巡回 ZP 演算は完全に一致することが確認される。図 6(c) は図 5(d) SS と図 5(a) 線形との差であり、画像のほぼ全域に渡り画像コンテンツとは特に無

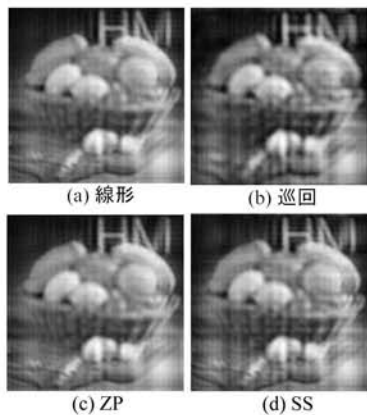


図5 各法によるホロからの再生像 (NA=0.2)



(a) [巡回-線形]差 (b) [ZP-線形]差 (c) [SS-線形]差

図6 再生像の輝度値差マップ (NA=0.2)

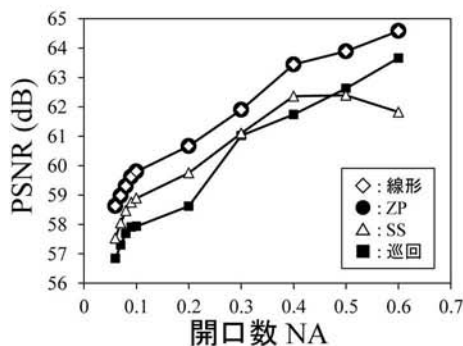


図7 PSNRの開口数依存性

関係に縦横周期的に差異・劣化が生じている。差の大きさは図6(a)と比較すると全体的に小さい。図6(a)と比較すると図6(c)では輝度値差の分布が全く異なることから、SS法ではCF雑音発生は回避されており、代わりにサブサンプリングしたことによる新たな雑音が発生することが解る。

図7にPSNRの開口数依存性を示す。線形演算とZP法のプロット点は全てのNAに対して完全に一致する。図6(b)および上記の結果からZP法

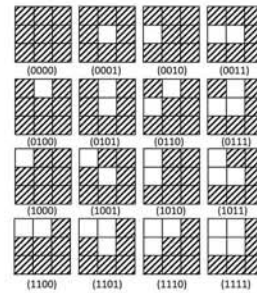


図8 4/9記録符号

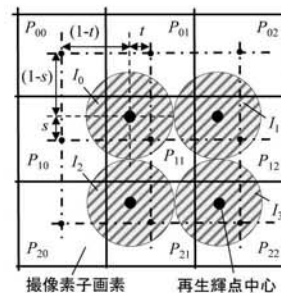


図9 再生輝点

は線形演算と定量的に完全に一致し、ZP法では線形演算と同様正確な畳込み計算ができ、よってCF雑音発生は完全に回避されることが確認できる。巡回演算およびSS法について見ると、図6の結果と同様、巡回演算は最も画質劣化が大きく、SS法は劣化が生じるものの巡回演算よりは改善されることが解る。但し、NAが0.5程度より大きくなると、SS法での劣化はかえって巡回演算より大きくなる。

以上、ZP法により確かに線形演算と同じ正確な畳込み計算が可能であること、巡回演算ではCF雑音により再生像の画質はかなり劣化すること、およびSS法ではサブサンプリングに起因する新たな雑音が発生するものの特に低NA領域では画質劣化はある程度抑えられることが解った。

3.2 BER評価

本節ではCGHをホログラムメモリへ適用した場合を想定し、BER特性からCF雑音の特徴、SS法の有用性を評価する。図8にBER評価に用いる4/9記録符号を示す。4/9符号は1ブロック(3×3画素)の左上2×2画素の明暗の組合せで(0000)から(1111)の4bitを表現する記録符号であ

る。デコード処理は16種のテンプレートとのパターンマッチングにより行う。図9に撮像素子上の再生輝点を示す。一般に再生輝点は回折限界により拡がりを持ち、その中心は撮像素子画素中心からズレる。図は輝点中心が画素中心から左へ t 、上へ s 並進移動した状態を示す。ここで t, s ($=0.0 \sim 1.0$)は画素ピッチで規格化した輝点の位置ズレを表すパラメータである。各輝点強度 I_i ($i=0, 1, 2, 3$)は t, s および各輝点中心を囲む最近接4画素の輝度 P_{ij} ($i, j=0, 1, 2$)を用い、線形補間により見積もる⁵⁾。以下では $t, s=0.0$ に設定し評価した。またホログラムメモリでは、再生輝点サイズは撮像素子の画素ピッチ程度とすることが一般的であるため、NAとしては回折限界式($=$ 光波長/画素ピッチ)から見積もられる0.1前後の値とした。BERはブロック単位でのエラー比で定義した。

まず、ZP法と巡回演算との比較を行い、CF雑音の特徴を評価する。図10にBERの閾値依存性を示す。ここで閾値はデコード処理過程で用いるパラメータであり、(0000)が(1111)に誤判定されるのを回避するために導入されている。0~100%間のいずれかの範囲で $BER < 10^{-4}$ が実現すればエラー無しでのデコード成功を意味する。NA=0.07とした。図ではZP法の場合、全体的にBERは低下し閾値約10~30%にて $< 10^{-4}$ が実現する。これに対し巡回演算ではBERは 10^{-1} 台未満には低下せず、CF雑音の発生がBERの悪化を招いていることが確認される。図11に画像データ領域のエラーブロック位置を特定したエラーマップを示す。エラーブロックを白で表示している。NA=0.07時、閾値が(a)10%、(b)20%、(c)30%でのエラーマップである。図10の巡回演算の結果では、閾値が10、20、30%となるにつれてエラーは増加する。図11ではこのエラー増加が画像データ領域端部から現れ始める様子が観察される。図1(b)よりCF雑音は画像端部で大きくなることが予想されたが、図11ではこの傾向が明確に表れている。図12に計算点 128×128 、画素ピッチ $1 \mu\text{m}$ 、NA=0.13とした4/9符号画像の再生像を示す。(a)は線形演算、(b)は巡回演算、(c)はZP法、(d)はSS法によるものであり、図4の(a)、(b)、(c)、(d)のホログラム形成・再生法で計算した結果である(再生には線形演算を使用)。(a)、(c)は目視で観察する限り差異はなく、また場所に依らず再生輝点は均一である。一方(b)では画像領域の外側

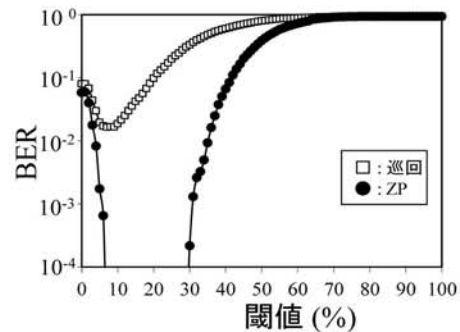


図10 BERの閾値依存性(NA=0.07)

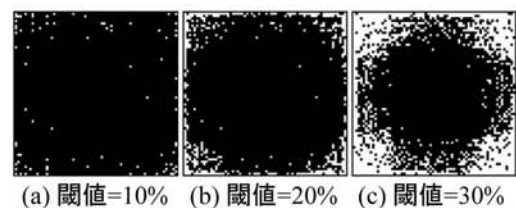


図11 エラーマップ(NA=0.07)

へ行くほど再生輝点の形状に歪、ボケが発生し出す。ここで用いた4/9符号画像は、図10、図11でのBER評価用4/9符号画像に比べ画像サイズはかなり小さいが、BER評価用画像においても同様の現象が起きていると考えられ、CF雑音は一般には画像領域端部で顕著となり、再生輝点の形状に直接影響を与えることでエラーを引き起こす特徴を有すると言える。

次にNAを0.1付近で変化させBER特性からSS法の有用性を評価した。図13に(a)NA=0.07、(b)NA=0.09、(c)NA=0.13でのBERの閾値依存性を示す。NAの増加に伴い $BER < 10^{-4}$ となる閾値範囲は拡大する。NA=0.07の場合、SS法の結果はZP法と比較すると若干 $BER < 10^{-4}$ を満たす閾値範囲が狭い。これはサブサンプリングに起因する雑音が画質を劣化させ、BERを悪化させた結果と解釈される。しかしながらSS法とZP法によるBER特性の違いは僅かであり、またNA=0.09、0.13ではこれらの特性はほぼ完全に一致する。図12(d)では図12(a)、図12(c)と比較すると目視する限り殆ど画質劣化は観察されず、また図12(b)のような再生輝点の変形も生じていない。以上のことからSS法では新たな雑音が発生するもののBER特性を殆ど悪化させないことが解る。

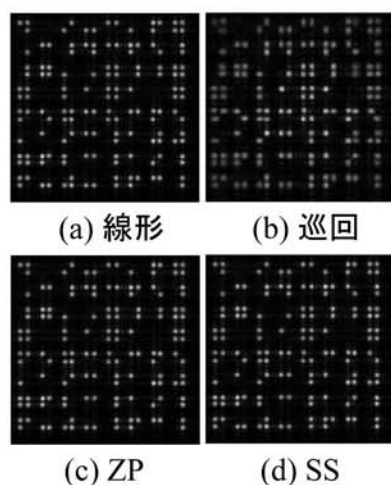


図 12 各法によるホロからの再生像 (NA=0.13)

4. まとめ

CGH 法における CF 雑音の特徴および SS 法の有用性について評価した。結果を以下に整理する。

- ・巡回演算ではエッジや画像領域端部で大きな CF 雑音が発生し、画質は劣化する。ZP 法では線形演算と完全に一致する畳込み計算が可能となり、これにより CF 雑音の発生は完全に抑制される。但し、巡回演算に比べ最低でも縦横 2 倍、計 4 倍の計算量になる。SS 法では ZP 法に比べ計算量を約 1/4 に低減できる。CF 雑音は完全に抑制されるが代わりに新たな雑音が発生し、若干の画質劣化を引き起こす。

- ・CF 雑音は再生輝点の形状を変形させる特徴を持つためエラー発生に直接寄与し、BER の顕著な悪化を招く。一方 SS 法での雑音は CF 雑音と異なり再生輝点形状を変形させるものではなく、これが BER 特性に与える影響は僅かである。よってメモリ応用を前提とした場合 SS 法は有用な計算法と言える。

参考文献

- 1) 辻内順平：ホログラフィー，pp. 332-368，裳華房 (1997)
- 2) 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, 11-15 July (1999)
- 3) T. Mitasaki and M. Senda : Write-Once Recording for

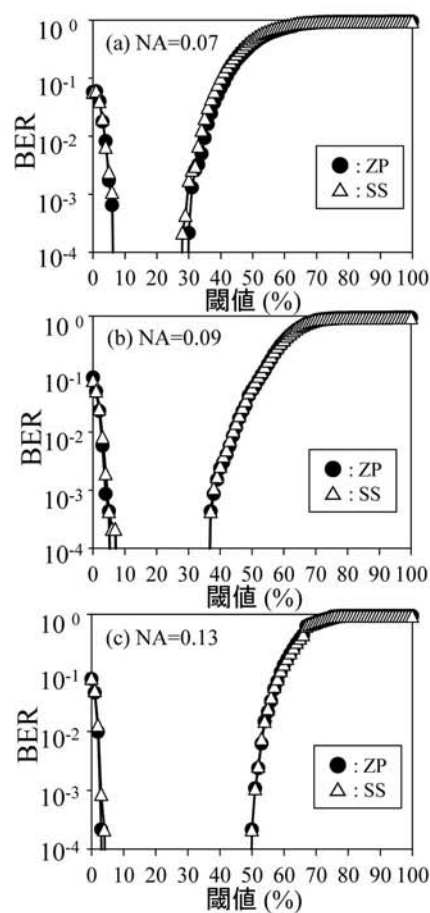


図 13 BER の閾値依存性

Multilayered Optical Waveguide-Type Holographic Cards, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 3, pp. 659-663 (2006)

- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) M. Ueno, Y. Kurokawa, T. Tanabe and M. Yamamoto : Fast Method of Computing Fresnel Diffraction Patterns, Proc. SPIE, Vol. 4225, pp. 96-101 (2001)
- 7) M. Endo, M. Ueno and T. Tanabe : Data Decoding Method and Data Decoding Apparatus, Japan laid-open disclosure public patent bulletin, JP 2004-348378A (2004)

【受理年月日 2012年 7月23日】