

タイトル	拡散型デジタルホログラフィにおける再生像の誤差評価
著者	高井, 信勝
引用	北海学園大学工学部研究報告, 31: 87-100
発行日	2004-02-20

# 拡散型デジタルホログラフィにおける再生像の誤差評価

高 井 信 勝\*

## Error Evaluation of Reconstructed Images in a Diffuse-type Digital Holography

Nobukatsu TAKAI\*

### Abstract

The error of images reconstructed from diffuse-type digital holograms consisting of 8-bit data is numerically investigated in order to use them as a technique for encryption and digital watermarking. It is evaluated by the standard deviation of the image difference between the original image and reconstructed one. It is revealed that the error is small for large phase modulation which is operated for the original image to make diffuse-type holograms. At the same time, the error evaluation is done with respect to the effect of hologram defects given by replacing the value of several pixels in a part of holograms with different one. On the basis of the error evaluation, a method by which the original image data are reconstructed in a perfect form is also presented.

### 1. はじめに

インターネット時代のいま、世界中のコンピュータは文字通りネット状に電話回線で結ばれており、電子化されたデジタルコンテンツ（情報）が世の中を常時飛び交っている。このような状況は、情報通信技術の発展を背景として成り立っており、情報伝達形態として光通信や通信衛星のインフラ整備が社会の産業構造や個人の生活環境までも変革するに至っている。こ

---

\* 北海学園大学工学部電子情報工学科

\* Department of Electronics and Information Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

れに伴って、電子化情報の交換やインターネット商取引が活発化に行われるようになり、種々のメディアの形で伝達される政府や企業そして個人の情報を悪意ある不正利用者から守る方策が重要な課題になっている。情報セキュリティと呼ばれるこの種の問題に対して、デジタルコンテンツの暗号技術<sup>1,2)</sup>と不正コピーの防止の抑止力としての電子透かし技術<sup>3-9)</sup>が近年多くの注目を受けている。

本研究では、光学の分野で開発されたホログラフィの技術<sup>10,11)</sup>をコンピュータによるデジタル演算で実現する画像情報のデジタルホログラムを暗号化技術、または、電子透かし技術に応用することを目的にして、復元(再生)データの誤差を定量的に解析した。このとき、情報を画像データとして扱い、それにランダム位相変調を施して作成する拡散型フーリエ変換ホログラムは、結果として、ランダムで統計的に一様な強度分布をもつにもかかわらず、それからいつでも画像情報を完全な形で再生できる。したがって、拡散型ホログラムを元の画像情報の代替として使用すると、ホログラム信号自体は全くランダムな信号であるので、そのままでは元々の画像情報は秘匿され、デジタルホログラム自体を一つの暗号化技術として見なすことができる。

一方、また拡散型ホログラムでは、情報がホログラム面全面に一様に分散して記録されるので、ある程度の冗長性をもつ記録メディアとしての特性がある。つまり、ホログラムの一部に付加的な情報を埋め込むことが可能であり、この特性を利用すると電子透かし技術に応用できる。このように、拡散型デジタルホログラムは、情報の暗号化技術として、あるいは電子透かし技術として両面に利用できる可能性を持っている。

このとき、画像情報にランダム位相変調を施して作成する拡散型フーリエ変換ホログラムを画像情報の代替とするためには、それから再生されるデータが完全に元情報のそれと一致するものでなければならない。しかしながら、デジタルホログラムを汎用の8ビット画像として作成すると、量子化誤差に伴う誤差が再生データに現われる。

本稿では、8ビットデータからなる拡散型のデジタルホログラムから再生される再生データの誤差をランダム位相量およびホログラム欠陥との関係において調べた。ここで、再生データの誤差とは、再生画像データと元画像データの各画素ごとの数値差であり、これを標準偏差によって評価した。また、ホログラム欠陥とは、ホログラムの一部に電子透かし情報を埋め込むことを想定して、その一部分をほかのデータで置き換える操作のことであり、これによって再生像に新たな誤差が生じる。そこで同時に、この再生像誤差を欠陥量すなわち置き換え数の関係として定量的に明らかにした。最後に、再生像に現れる誤差特性に基づいて誤差の影響を排除する完全な元データ再生法を提案する。

## 2. 拡散型フーリエ変換デジタルホログラム

よく知られているように、光学的なホログラフィは、物体の振幅と位相の両方を完全に保存し、3次元物体をあるがままの姿で立体的に再生する光学技術である。このとき、物体の振幅と位相の全情報はホログラムとして写真乾板のような記録媒体に保存される。この記録は、物体からの回折光波(物体波)と参照光波(参照波)の干渉パターンの強度記録であるので、拡散反射する物体からの光波をホログラムとして記録すると、ホログラムは複雑でランダムな干渉パターンとなる。これは、光波が物体表面でランダムな位相変調を受けることによるもので、結果として、ホログラム自体をみてもそれから物体情報を直接には知ることはできない(図3参照)。

このような特性を持つホログラフィの技術を、計算機上で実現すると、それはひとつの暗号化技術として利用できる。すなわち、デジタルコンテンツをホログラムに変換して配信すると、たとえ伝送途上で傍受されてもコンテンツ情報はランダムなホログラムデータであるので、セキュリティの高い情報伝達ができる。これを実現するために、デジタルコンテンツをホログラムの形に変換するという事は、それを画像データと同様な2次元配列のデータとして扱うことになる。つまり、コンテンツ情報を画像データの形でホログラムに変換して伝送することになる。

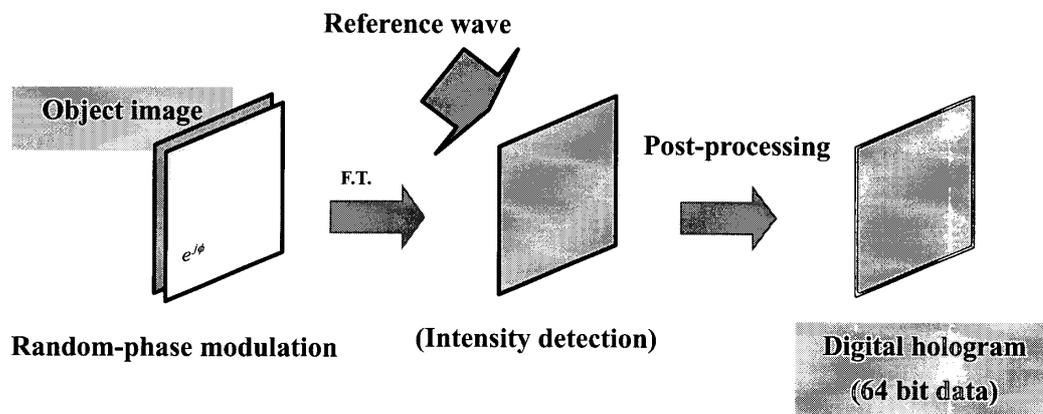


図1 拡散型デジタルホログラムの作成手順

図1に拡散型のフーリエ変換デジタルホログラムの作成手順を示す<sup>12,13)</sup>。この手順を順に述べると次のようになる。

- (1) まず、物体画像(Object image)を、ランダム位相因子 $e^{i\phi}$ で位相変調する。ここで、 $\phi$ はガウス乱数で与えるランダム位相である。
- (2) (1)によってランダム位相変調を施したものを2次元フーリエ変換する。
- (3) (2)の結果に光の斜め照射に相当する平面波信号(画像)を加えて強度検出する。これに

よって通常の光学的なホログラムに相当するものが得られる。

- (4) デジタルホログラフィでは、像再生に無関係な項を除く後処理 (Post-processing) を行う。これでデジタルホログラムが作成される。

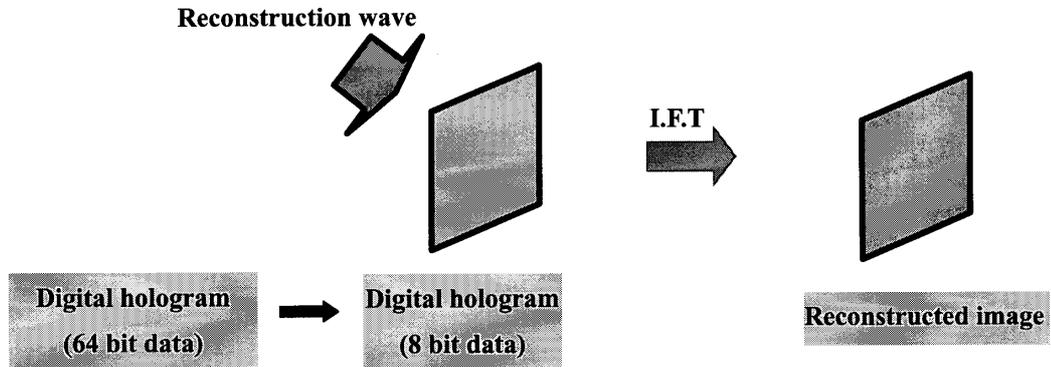


図2 デジタルホログラムから再生像を得る手順

以上の手順で作成されたデジタルホログラムから図2に示す手順で再生像を得ることができる。つまり、物体画像の再生像は、つぎの2つの演算を実行して得ることができる。

- (1) デジタルホログラムに適切な再生波信号を乗じる。
- (2) (1)の結果を2次元逆フーリエ変換する。

解析的な結果によると、物体画像を記述する非負の信号  $g_0(x, y)$  の再生像の振幅分布  $g_R(x, y)$  は

$$g_R(x, y) = g_0(x - a, y - b) \exp[-i\phi(x, y)] + g_0[-(x + a), -(y + b)] \exp[-i\phi(x, y)] \quad (1)$$

と得られる<sup>12),16)</sup>。ここで、 $a$  および  $b$  は参照波信号の傾きをあたえる定数である。式(1)の結果はランダム位相  $\phi$  を含むけれども、右辺の1項目と2項目が完全に空間分離しているときには、おのおのの項の絶対値をとることによって

$$|g_R(x, y)| = g_0(x - a, y - b) + g_0[-(x + a), -(y + b)] \quad (2)$$

となる。ここで、物体画像  $g_0(x, y)$  が非負のデータであることを用いた。この結果は、再生像は  $(x, y)$  座標面において座標点  $(a, b)$  および  $(-a, -b)$  を中心として、原点の周りで中心対称な2つの像として得られることを意味している。そして、これら2つは光学的なホログラムからの再生像の実像と虚像に対応している<sup>14-16)</sup>。

### 3. 再生像の誤差評価

上で述べた手順で得られたホログラム再生像の一例を、物体画像およびデジタルホログラムとともに図3に示す。ここにみられるように、再生像は式(2)に従って視覚的には正しく再生されるように見える。実際、8ビットデータ画像のデジタルホログラムを、64ビット精度(倍精度)の演算で作成し、それからの再生像を同精度の演算で得ると元画像  $I_{original}$  と再生像  $I_{reconstructed}$  の誤差, すなわち  $\Delta I = I_{reconstructed} - I_{original}$  は無視できるほどに小さい。現実には、この誤差は画像差の標準偏差

$$\sigma_{\Delta I} = \sqrt{\langle \Delta I^2 \rangle} \tag{3}$$

によって定量的に求めると、 $\sigma_{\Delta I} \approx 10^{-9} \sim 10^{-10}$  程度である。この値は、ランダム位相変調に用いる乱数値によって変動するとしても、再生像を元画像とおなじ8ビットデータとすると両者は完全に一致していると考えてよい。

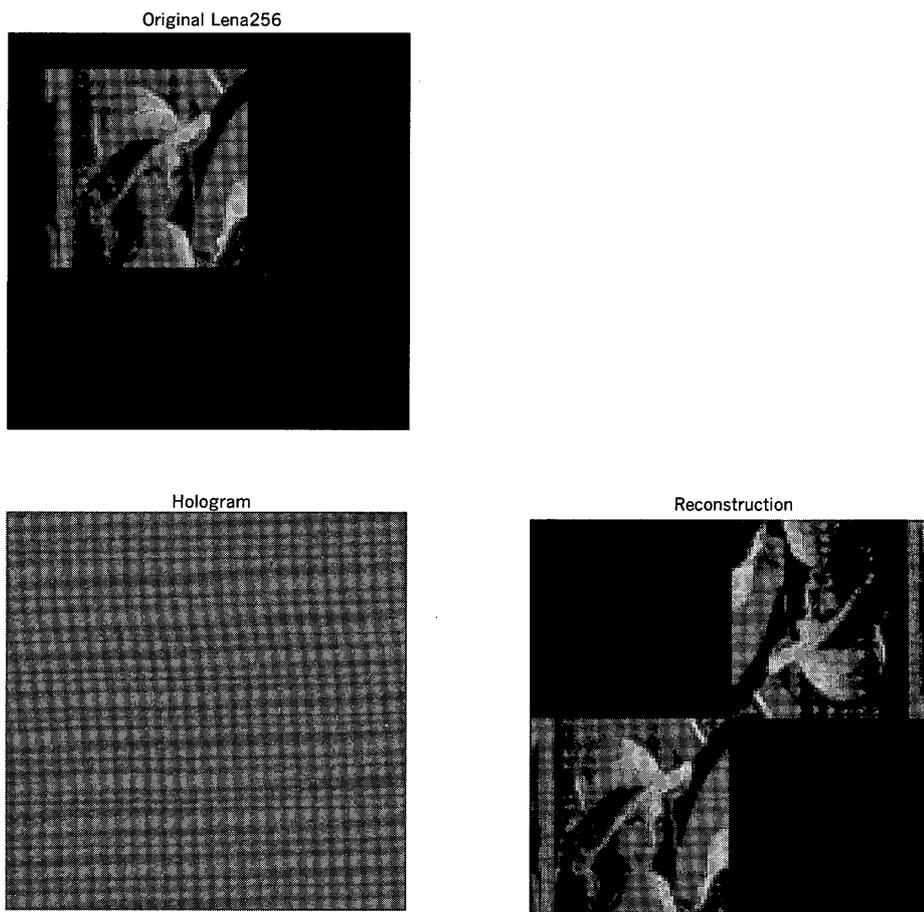


図3 元画像 (左上), デジタルホログラム (左下) と再生像 (右)

ところが、デジタルホログラムを元画像の暗号化コンテンツと利用することを考えると、ホログラムを 64 ビットデータではなく、汎用の画像データと同様に 8 ビットデータとして保存し、配信することが現実的な意味で要求される。この場合、量子化精度の低下による再生像の劣化を引き起こす結果は避けられない。

以下では、デジタルホログラムを 8 ビットデータに変換したときの元画像と再生像の差違（誤差）を式(3)の標準偏差で定量的に評価し、誤差が最小になる条件を調べるとともに、コンテンツ情報が正確に再生される手法を考察した。また、同時に、ホログラムに欠陥がある場合に再生像に与える影響を併せて数値的に解析した。これによって、ホログラムをコンテンツ情報の暗号媒体として利用することと、デジタルコンテンツの不正コピーに対する著作権侵害を保護するための電子透かしを埋め込む情報セキュリティ技術に役立つ有用な知見が得られた。

図 4 に、実験で得られた元画像と再生像の画像差の標準偏差  $\sigma_{dI}$  (式(3)) の値を、ランダム位相の標準偏差  $\sigma_p$  を  $2\pi$  で規格化した量の関数として示す。ここで、ランダム位相はガウス乱数を用いて与えており、 $\sigma_p$  はその標準偏差である。図におけるマーカー  $\circ$  はホログラム欠陥が無い場合であり、 $\square$ ,  $+$ ,  $\diamond$  は、それぞれ、ホログラム欠陥数  $n$  が 20, 100, 512 の場合である。ここ

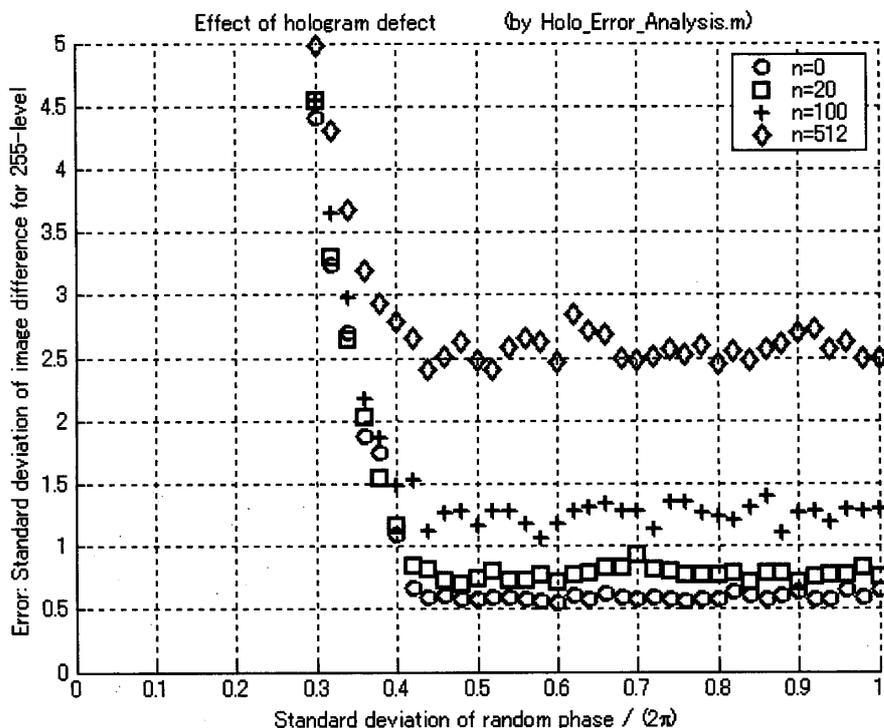


図 4 8 ビットホログラムからの再生像の誤差。横軸はランダム位相の標準偏差、縦軸は式(3)で定義される元画像と再生像の画像差の標準偏差。マーカー  $\circ$  はホログラム欠陥が無い場合。マーカー  $\square$ ,  $+$ ,  $\diamond$  は、それぞれ、ホログラム欠陥数  $n$  が 20, 100, 512 の場合。

で、ホログラム欠陥数  $n$  とは、付加的な情報を書き込むことを想定して、ホログラムの一部を別の値に置き換えたときの画素数である。この図4の結果からつぎの2つのことが読みとれる。

まず、第一に、再生像の誤差はランダム位相量  $\sigma_p$  が小さいときに非常に大きく、およそ  $\sigma_p > \pi$  の領域では欠陥数  $n$  に依存するが、ほぼ一定の値をとることがわかる。このような振舞い、つまりランダム位相量が小さいときに誤差が大きく、それが増加するにつれて誤差が急激に減少する現象は一見奇異な振る舞いであるが、つぎの理由によると考えられる。これは、図3にみられるような均一で空間的に定常なホログラムはランダム位相量が大きい  $\sigma_p > \pi$  の場合に形成されるが、 $\sigma_p < \pi$  の場合には定常なホログラムにはならないことに起因していると考えられると理解できる。

このことは、極端であるが、 $\sigma_p = 0$  の場合を考えると分かりやすい。この場合には、ホログラムに記録されるのは元画像のフーリエスペクトルと参照信号の干渉強度である。図3に示す元画像のような場合、フーリエスペクトルはゼロ周波数の周りに分布する低周波のスペクトルが支配的で、そこに非常に大きいスペクトルピークが現れる。つまり、この場合には空間的に非定常なホログラムとなる。これに対して8ビット量子化を行うと、強い低周波成分の部分だけが量子化の対象になって、画像の細かい形状を形作る高周波成分は除去されてしまい、再生像は大きな誤差をもつことになる。結果として、8ビット量子化のデジタルホログラフィで、この誤差を小さくし良質な再生像を得るためには、図3に示すような定常な強度分布をもつホログラムとなることが必要条件になる。したがって、ランダム位相変調においては  $\sigma_p > \pi$  の条件を満足することが要求される。

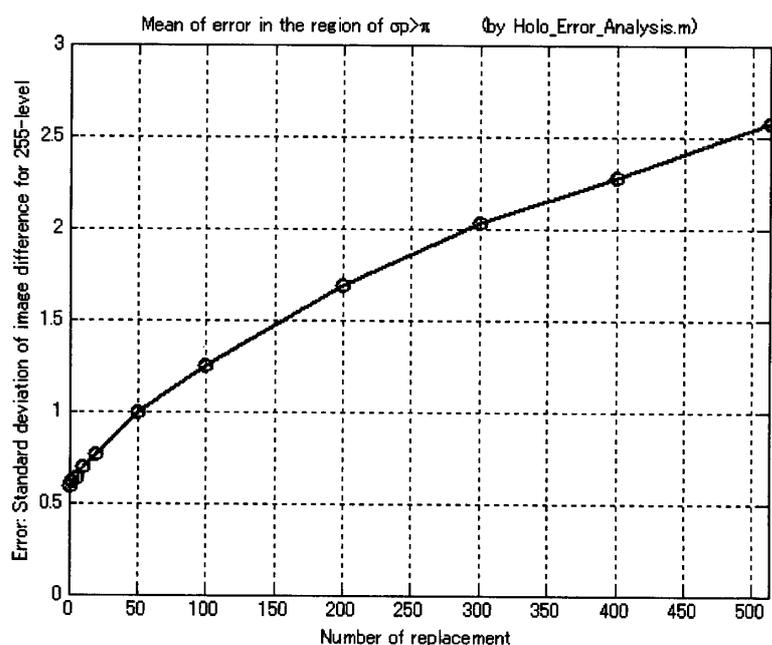


図5 ホログラムの欠陥数の関数としての再生像の平均誤差

図4にみられる第二の特徴は、再生像誤差のホログラムの欠陥数  $n$  の依存性である。ここでは、欠陥数とはホログラムの中心部分の  $n$  個の画素値をゼロに置き換えて欠陥とした。図4にみられるように、再生像の誤差は、 $\sigma_p > \pi$  の領域では欠陥数  $n$  ごとにほぼ一定の値を示しているが、用いられるランダム位相が変わるとそれに起因して誤差は変動する。にもかかわらず、ホログラムの欠陥数  $n$  が大きくなると再生像の誤差が増大することが明確に認められる。

この傾向をランダム位相量が  $\sigma_p > \pi$  の領域で得られた再生像の誤差を平均した平均誤差によって詳細に調べた。その結果が図5であり、ここにはホログラムの中心部の一続きの  $n$  個の画素をすべてゼロに置き換えたときの平均誤差を欠陥数  $n$  の関数として示している。ここでは、再生像の誤差が欠陥数  $n$  とともに単調に増加する当然な結果がみられるが、重要な点はその誤差の大きさである。まず、欠陥がない場合には、図5に示されている平均誤差は 0.5924 であった。この値は 1 以下であるので、標準偏差の意味で、再生像の誤差を大きく見積もっても 0 ビットプレーン (0 bit-plane) で起きることを意味している。欠陥数が 50 の場合には、平均誤差は 0.9951 と得られた。これは 10 進数で 1 ないし 2 程度の誤差であるので 0 ~ 1 ビットプレーンの値が高い確率で変動することになる。図6は以上の説明を視覚的に示すもので、欠陥数が 300 のときに得られた平均誤差は 2.0335 であって、この場合には、図に示すように 2 ビットプレーンにも誤差変動が現れることになる。

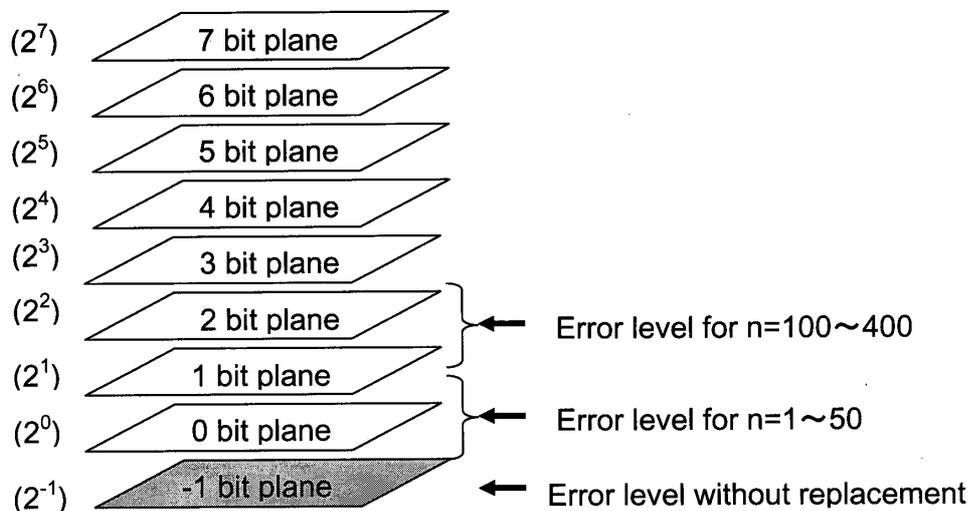


図6 ホログラム欠陥数  $n$  (一部を別の値に置き換えた画素数) が再生像データのビットプレーンに与える影響。

ここまでは、ホログラムの欠陥として中心部の一続きの  $n$  個の画素をすべてゼロに置き換えたものであったが、再生像に与える影響は、置き換える値にも依存する。図7はホログラム強度のヒストグラム分布の一例である。これにみられるように、拡散型ホログラムの強度分布は、 $[0, 255]$  の領域の中心部にピークを持つガウス分布に近い。したがって、画素値をゼロに置換

することは平均値から大きくずれた値を欠陥として与えることになる。図8は、横軸に置き換え値を全画素値の平均値で規格化した量を取り、再生像の誤差を調べた結果である。ここでは、置き換えがない  $n=0$  の場合と、欠陥数（置き換えた画素数）が  $n=20, 100$  の場合が示されている。いずれも置き換え値が平均値に等しいときに誤差が最小で、平均値から離れるにつれて誤差が大きくなるのがわかる。換言すると、平均値に近い値で置き換えると、欠陥数  $n$  が大きい場合でもホログラム再生像の誤差を小さくできることがわかる。

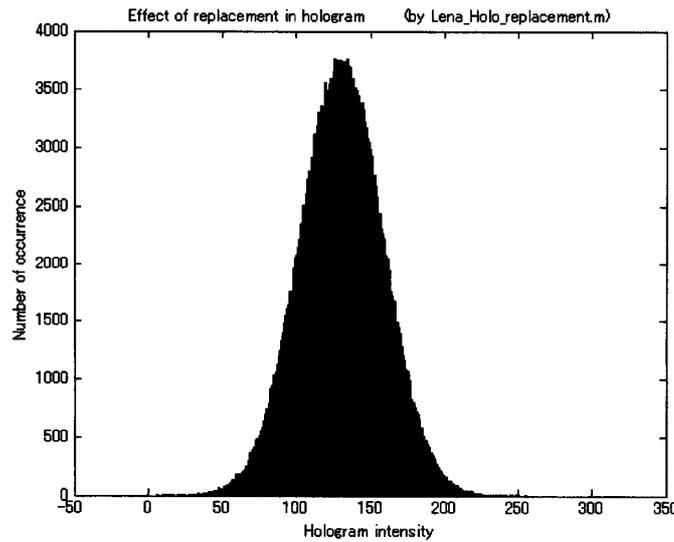


図7 ホログラムデータ値のヒストグラム分布

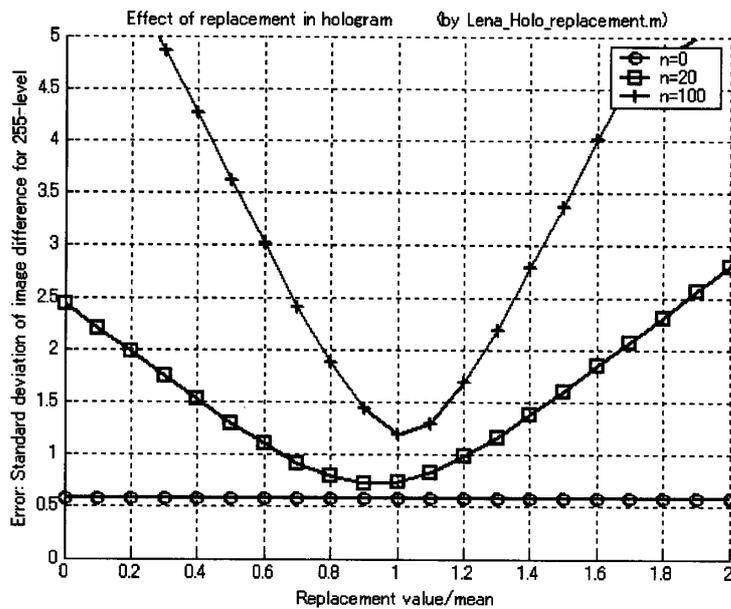


図8 ホログラム欠陥としての置き換え値を変えたときの再生像誤差。横軸はホログラムの画素値の平均値で規格化した置き換え値。

#### 4. ビット操作による完全再生法の提案

ここでは、まずホログラム再生像の誤差を具体的にみてみよう。図9、図10は、元データと再生データの一部の引き続く6個の画素値の数値を比較したものである。いずれも数値は、10進数と2進数の両方で比較されていて、誤差が生じている再生データは網掛けで示されている。図9は、ホログラムデータに何も変更を加えないで再生した結果で、再生データには10進数で1～2の範囲で誤差が現れている。すなわち、2進数表示からわかるように、ビットプレーンで言うと最下位ビットの0ビットプレーンか一つ上の1ビットプレーンの値が元データとは異なっている。

元データ	再生データ
42	42
67	68 (67+1)
72	72
70	71 (70+1)
63	65 (63+2)
51	52

元データ	再生データ
0101010	0101010
1000011	1000011
1001000	1001000
1000110	1000111
0111111	1000001
0110011	0110011

図9 ホログラムの置き換えがない場合の元データと再生像データの比較の一例。上図は10進数表示、下図は2進数表示。

図10は、ホログラム中の連続する100個の画素値を0に置き換えて再生像を得たときに、一例として、取り出した6個の再生データである。この場合には、ホログラム欠陥数が多くなった結果として6個の再生データのすべてに誤差が現れていて、その誤差の範囲は10進数で3～6となっている。したがって、この場合下位の3ビットに誤差が生じていることになる。このように、ホログラムの欠陥数が $n=100$ 程度までは、下位3ビット以内の誤差であり、上位4ビット（10進数で $2^4=16$ ）以上に相当する大きな誤差は生じない。

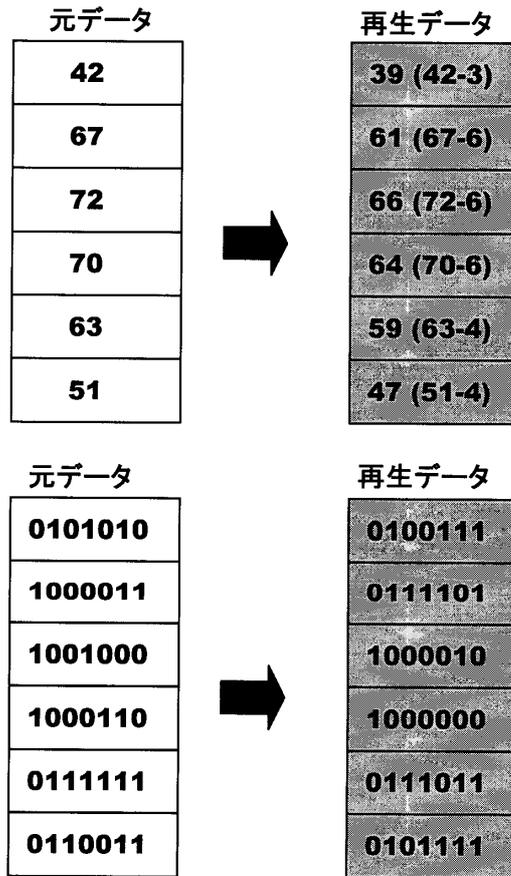


図10 ホログラムの置き換え数が  $n = 100$  の場合における元データと再生像データの比較の一例。上図は 10 進数表示, 下図は 2 進数表示。

このように、ここでの条件下で、誤差が 3 ビット以内に生じることが見いだされたが、これによって上位ビットの値が元データと一致しているとは限らない。たとえ誤差が最下位ビットのものであっても、桁上がりや桁下がりが起きると上位 4 ビットの数値も変化するからである。たとえば、図 9 の下から 2 番目の場合のように、元データが 63 で再生データが 65 であると、誤差は 2 であるが、 $63 = (0111111)_2$  だから誤差 2 が加わって  $65 = (1000001)_2$  となり、桁上がりの影響が上位ビットに及ぶことになる。

ここで述べた誤差の原因は、元信号にランダム位相変調を用いて作成した 8 ビットデータの拡散型のホログラムでは避けられない問題である。したがって、この手法によって元データを完全な形で再生するためには、上述した誤差の特性を踏まえた何らかの工夫が必要になる。以下では、8 ビットからなる元データを完全に再生する一つ手法を提案する。図 11 はこの手法を示すもので、その手順はつぎの通りである。

- (1) 元データの 1 画素の 8 ビットを上位 4 ビットと下位 4 ビットに分解して二つに分解する。
- (2) 分解したデータのおおのをお上位 4 ビットとし、それらのデータの下位 4 ビットはすべて (1000) とする 8 ビットデータを作る。

- (3) 二つのデータの配列を決め、すべてのデータを画像のような2次元配列とする。そして、そのデータ配列の拡散型デジタルホログラムを作る。
- (4) (3)のホログラムの再生像として再生データを獲得し、その上位4ビットだけを取り出す。下位4ビットは放棄する。
- (5) (3)のデータ配列に従って、(4)の4ビットデータから8ビットデータを再構築する。

以上の操作を実行すると、元データの上位4ビットも下位4ビットも処理過程では上位ビットとして扱われるために、下位ビットに現れる再生誤差の影響を回避することができる。このとき、手順(2)で下位4ビットを1000としたビット操作が肝要である。こうすると、たとえ10進数で+7の誤差が生じて、その部分は1111となるだけで、上位4ビットへの桁上がりは起きない。また、逆に、-8の誤差が生じたときには0000となり、やはり上位4ビットへの桁下りの影響が生じない。つまり、下位4ビットを1000とすることで10進数で-8~+7の範囲の誤差は、この部分で吸収される。その結果、上位4ビットの値は誤差に影響されることなく完全の形で再生される。

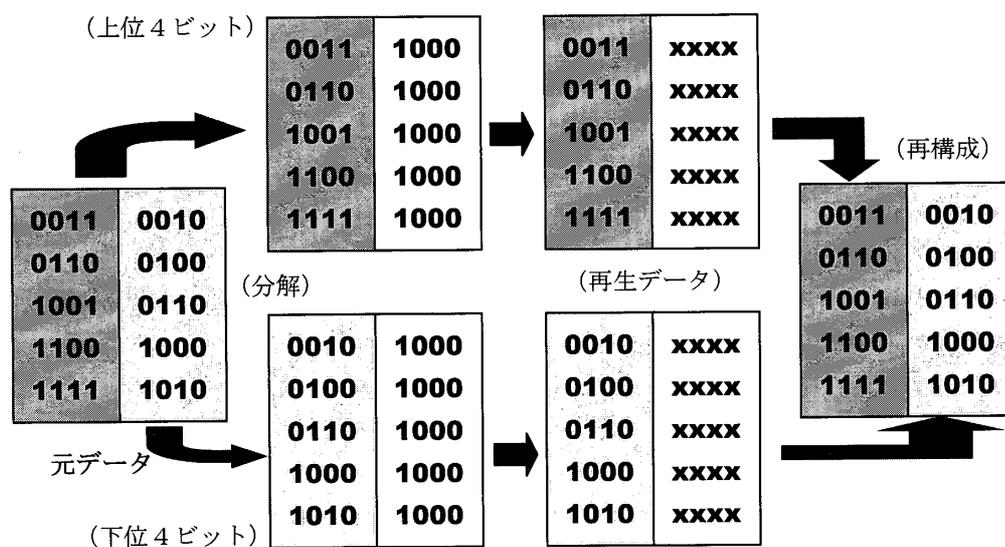


図11 8ビットの元データを完全に再生・復元する方法。元データの上位4ビットと下位4ビットを別々にホログラム化すると、その再生データの下位4ビットが誤差を吸収する。この結果、おのおのの上位4ビットは正確に再生される。

## 5. おわりに

この研究では、画像情報データにランダムな位相変調を施すことで作成した拡散型の8ビットホログラムからの再生像の誤差を定量的に調べた。その結果は、以下のように要約される。

- (1) ランダム位相の標準偏差  $\sigma_p$  が  $\sigma_p < \pi$  で誤差がきわめて大きく、 $\sigma_p > \pi$  でそれが小さくなることが明らかになった。
- (2)  $\sigma_p > \pi$  の領域での誤差は、ホログラムに欠陥を与えたときの欠陥数とともに大きくなるが、欠陥数  $n$  が  $n = 1 \sim 50$  で  $0 \sim 1$  ビットプレーン、また  $n = 100 \sim 400$  では  $1 \sim 2$  ビットプレーンに誤差が現れる。
- (3) ホログラム欠陥として与える置き換えによる誤差は、置き換える数値が画素値の平均値のとき最小になり、それから離れるにつれて誤差は大きくなる。
- (4) 元データを完全に再生する手法として、図 11 に示すデータ分解法を提示した。

本研究は、北海学園大学ハイテクリサーチセンター事業の研究プロジェクト「視覚・画像・音声・言語情報処理の高度化と知的計測制御技術への応用」の一環として行った。

## 参 考 文 献

- [1] セアラ・フラナリー, デイヴィッド・フラナリー著 亀井よし子訳: 「16歳のセアラが挑んだ世界最強の暗号」, (NHK出版, 2001)。
- [2] サイモン・シン著 青木薫訳: 「暗号解読」, (新潮社, 2001)。
- [3] P. Refregier and B. Javidi: "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," *Opt. Lett.*, Vol. 20, No. 7, 767-769 (1995).
- [4] 松井甲子雄: 「電子透かしの基礎」, (森北出版, 2000)。
- [5] 小野束: 「電子透かしとコンテンツ保護」, (オーム社, 2001)。
- [6] 森本典繁: 電子透かし, *光学*, Vol. 29, No. 7, 431-434 (2000)。
- [7] 森本典繁, 清水周一, 小林誠士: データハイディング技術, *映像メディア学会技術報告*, Vol. 21, No. 31, 3-8 (1997)。
- [8] 吉浦裕, 金野千里, 黒須豊: 電子透かしとその応用, *日立評論*, Vol. 80, No. 7, 15-20 (1998)。
- [9] 遠藤直樹, 小出昭夫: コンテンツ配信と不正コピー防止, *電子情報通信学会誌*, Vol. 83, No. 2, 117-121 (2000)。
- [10] J.W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, Chp. 8, 198-254 (McGraw-Hill, San Francisco, 1968).
- [11] M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, Chpt. 8, 412-516 (Cambridge University Press, 7th ed. 1999).
- [12] 高井信勝, 三船雄都, 成田貴文: デジタルホログラフィを用いる電子透かし法, *北海学園大学工学部研究報告* 第28号, pp.261-275 (2001.2)。
- [13] 三船雄都, 高井信勝: デジタルホログラフィを用いる電子透かし技術の研究, *北海学園大学大学院工学研究科紀要「工学研究」*, No.2, pp.173-184 (2002.9)。
- [14] 高井信勝: デジタルホログラフィと電子透かしへの応用, *ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報*,

第 22 卷, 第 4 号, pp. 2 - 5 (2002.10)。

[15] 高井信勝: 「MATLAB 入門」, (工学社, 2000)。

[16] N. Takai and Y. Mifune: "Digital watermarking by a holographic technique", Applied Optics, Vol. 41, No. 5, 865-873 (2002).