

離散コサイン変換による計算機ホログラムのデータ圧縮

Data Compression for Computer Generated Holography based on Discrete Cosine Transform

小原 泰平*, 大坊 真洋*, 田山 典男*

Taihei Obara*, Masahiro Daibo*, Norio Tayama*

*岩手大学工学部

*Faculty of Engineering Iwate University

キーワード: 計算機ホログラム (Computer Generated Holography), 基底 (Base)
離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform), 圧縮 (Compression)

連絡先: 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学部 大坊 真洋
Tel.: (019)621-6983, Fax.: (019)621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

1. まえがき

現在, 物体を立体的に表示させる方法で, 最も用いられているものは二眼立体視である。しかしながら, 二眼立体視は, 特殊な眼鏡を使用しなければならず煩わしさがあり, さらに, 人間が立体を認識する際の視差, 輻輳, 調整といった生理的要因のバランスが悪く疲労を感じる。

一方, 物体を立体的に表示させる別の方法として, ホログラムが知られている。一般的な写真は振幅情報のみを記録したものであるが, ホログラムは, 物体の振幅情報の他に位相情報をも記録したものである。記録したホログラムは一見しただけでは何が映っているのかわからない。しかし, 生成したホログラムに再生光を当てると, 干渉縞により回折された光が立体像を瞬時に映し出す。この像は, 記録した物体と等価の波面を再現しており, 人間の立体認識の要因を全て満たすため, 違和感がなく, 究極の立体表示法の一つとされている。

また, ホログラフィ技術の一つとして, 計算機ホログラフィ (CGH) がある。ホログラム

は物体にレーザ光を当て, その反射, あるいは透過した散乱波 (物体光) と, 参照光とを干渉させた縞を記録したものである。CGH は, 記録する干渉縞を計算によって, 数値データとして求める手法である。このデータとして求めたものを画像化し, 電氣的に光の波面を制御できるデバイスを使用して, その数値データに対応して波面を制御すれば, 即時に立体像を再現することが可能となる。また, 通常のホログラムの場合, 実際に存在する物体, あるいはその模型を作成しなければならいのに対し, CGH は例えその物体がそこに存在しなくても, その物体の数値データさえあればホログラムが生成可能である。

しかしながら, ホログラムには, 一般に非常に高い解像度が要求される。また, 本研究の CGH はフレネル型 CGH であるため, 物体の標本点と, ホログラムの標本点の全組み合わせを計算する必要がある, その膨大な情報量の処理は避けられない。

そこで, 本研究では, この問題を解決するために, 画像圧縮技術等に使われる離散コサイン変換 (DCT) の基底に注目し, 2 次元 DCT の基底画像をホログラムに変換する基底ホロ

グラムを提案する．そして，対象となる画像信号に最適な分だけの基底ホログラムでホログラムを合成することで，情報圧縮されたホログラムを生成する新しいCGHの情報圧縮法を提示する．また，その再生画像に対して，PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)による定量的評価を行い，本方法の有効性を示す．

2. 本方法の原理

2.1 情報量圧縮の原理

Fig.1 に本方法による CGH の情報圧縮のモデル図を示す．まず，2次元 DCT には，直流成分から高周波成分までそれぞれ， 8×8 画素の基底画像が全部で 64 種類存在する．これらの基底画像の各成分をホログラムに変換する．この変換したホログラムをここでは“基底ホログラム”と呼ぶことにする．計算した基底ホログラムはメモリに蓄えておく．ここまでは(同図で点線により囲んでいる部分)は，事前に計算可能である．

次に実行時の処理は，始めに，3次元の仮想物体から，ある奥行きでの2次元の画像を取り出す．そしてその画像を， 8×8 画素を1ブロックとした画像ブロックに分割する．この処理は，画像ブロック毎に独立して行うことができる．次に，画像ブロックに DCT を施し，画像ブロックの DCT 係数を求める．ここで，一般に画像信号に DCT を行うと，低周波側に値が集中する．また，人間の眼は，低周波の変換に敏感であることに對し，高周波の変化には鈍感である．このことを利用すると，DCT

係数の量子化ステップ値を，低周波側は小さく，高周波側は大きくすることにより，画像劣化を抑えながら情報圧縮が可能となる．

そして，量子化した DCT 係数と，メモリに蓄えておいた基底ホログラムを，各々に対応させ，掛け合わせることで最終的に1枚のホログラムにする．この場合，全ての種類の基底ホログラムを取り出す必要はなく，再生に最適な分だけ取り出せばよい．

2.2 離散コサイン変換の行列表現

離散コサイン変換(DCT)は，離散フーリエ変換(DFT)同様に，信号の分解法の1つとされている．DCT は，画像圧縮技術に對し，非常に相性の良い変換法である．その理由の1つは，DFT では，実数の信号を処理する場合，複素数演算が必要となるが，DCT では，信号が実信号(実数値)であるならば，全て実数演算で実行することが可能であるからである．さらに，DCT には，高速フーリエ変換(FFT)のような高速演算アルゴリズムが存在し，その応用性は広いと考えられる．

ここでは，後に本方法に DCT を適用するための準備として，DCT を行列表現する．

DCT の変換式は，式(1)のように表される．

$$X_j = \sqrt{\frac{2}{N}} c_j \sum_{i=0}^{N-1} p_i b_{ij} \quad (1)$$

ただし，

$$b_{ij} = \cos \left[\frac{(2i+1)j\pi}{2N} \right]$$

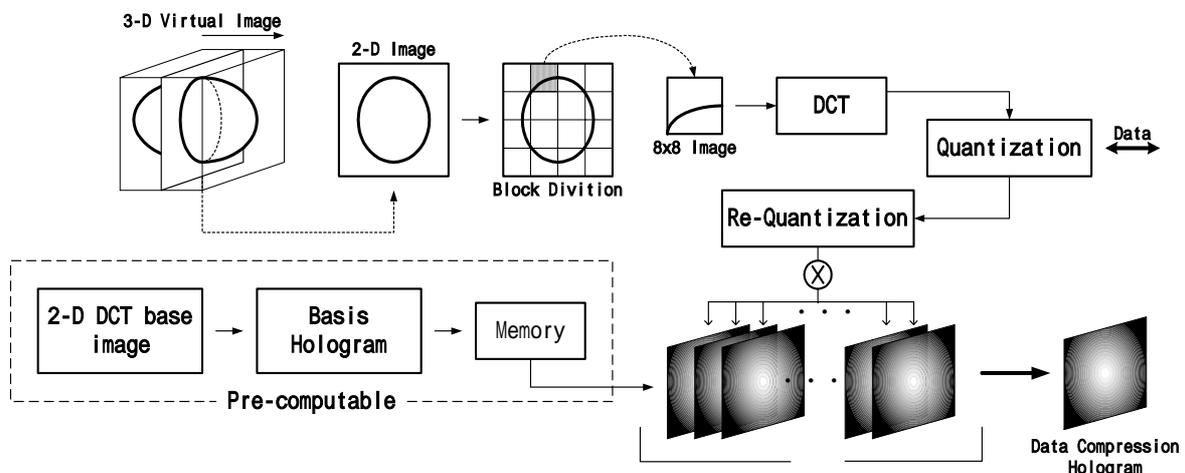


Fig.1 Modeling of data compression for CGH.

$$c_j = \begin{cases} 1, & j = 1, 2, \dots, N-1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}, & j = 0 \end{cases}$$

ここで、 X_j : DCT 係数、 N : 信号数、 c_j : 重み係数、 p_i : 信号値である。DCT には、 b_{ij} のコサイン関数のサンプル値、重み係数、 $\sqrt{2/N}$ のスケーリング係数からなる、基底をもっている。

画像は、2次元に分布した輝度の情報をもつ離散点の集まり、つまり画素で表現される。画像に DCT を適用するために、式(1)を2次元に拡張する必要がある。DCT には可分性という性質があり、多次元の DCT を単に1次元 DCT の繰り返しとして実行することができる。このことにより、容易に式(1)を2次元に拡張できる。今、 $M_1 \times M_2$ の画素をもつ2次元画像 $p_{i_1 i_2}$ に対する2次元 DCT は式(2)となる。

$$X_{j_1 j_2} = \frac{2c_{j_1} c_{j_2}}{\sqrt{N_1 N_2}} \sum_{i_1=0}^{N_1-1} \sum_{i_2=0}^{N_2-1} p_{i_1 i_2} b_{1i_1 j_1} b_{2i_2 j_2} \quad (2)$$

ただし、

$$b_{1i_1 j_1} = \cos \left[\frac{(2i_1+1)j_1\pi}{2N_1} \right], b_{2i_2 j_2} = \cos \left[\frac{(2i_2+1)j_2\pi}{2N_2} \right]$$

ここで、 8×8 画素の画像を対象とした場合の、2次元 DCT の基底画像を Fig.2 に示す。全 64 個の各基底画像は対応する周波数はそれぞれ異なり、基底画像の1番左上の成分を直流成分(DC成分)、その他の成分は交流成分(AC成分)となっている。DCT の基底は固定基底であり、任意の画像は基底の線形結合として表現される。

式(2)を見ると、画像の濃度値とコサイン関数のサンプル値の項が積和される形式となっている。そこで、画像の濃度値と、基底の部分とを分けて行列表現にすると式(3)のようになる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{P} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{X} は DCT 係数ベクトル、 \mathbf{P} は画像濃度ベクトル、 \mathbf{B} は DCT 基底行列である。

2.3 計算機ホログラムの行列表現

Fig.3 でフレネル型の計算機ホログラム (CGH) モデルを示す。3次元仮想物体、参照光、ホログラムの位置関係が示されている。

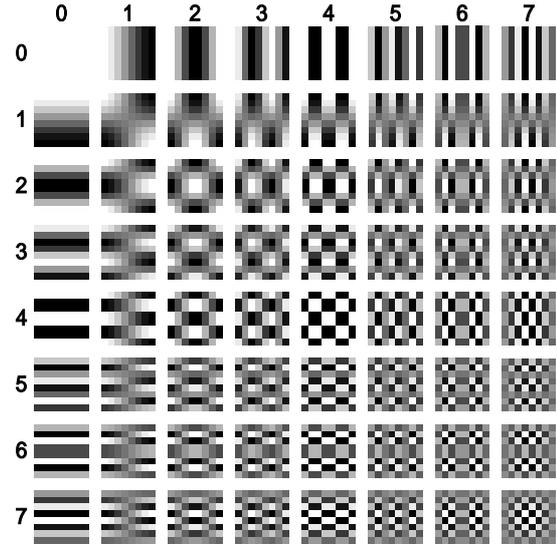


Fig.2 Base image of 2-D DCT.

ここでは、仮想物体を、標本点上に多数の点光源が分布し、それらの集合によって構成されているものとする。この物体から発生する物体光は、各点光源から発せられる球面波の総和であると考えて、ホログラム面にはフレネル回折光 W_o が到達する。よって、その振幅分布は式(4)により計算できる。

$$W_{ll_2} = \sum_{i_1=0}^{L_1-1} \sum_{i_2=0}^{L_2-1} \frac{P_{n_1 n_2}}{r} \exp \left\{ i \left(\frac{2\pi}{\lambda} r + \phi_{n_1 n_2} \right) \right\} \quad (4)$$

ただし、

$$r = \sqrt{(x_n - x_l)^2 + (y_n - y_l)^2 + z^2}$$

ここで、 $P_{m_1 n_2}$: 仮想物体の (m_1, n_2) 番目の点光源から発せられる物体光の振幅、 r : 仮想物体の (m_1, n_2) 番目の標本点とホログラムの (l_1, l_2) 番目の標本点間の距離、 $\phi_{m_1 n_2}$: (m_1, n_2) 番目の物体光の初期位相、 λ : レーザ光の波長である。

参照光は W_R とし、再生した像と重ならないように、 y 方向に傾かせた方向から入射させたとすると、式(5)のようになる。

$$W_R = A_R \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} y_{l_1} \sin \theta \right) \quad (5)$$

ここで、 A_R : 参照光の振幅である。

物体光と、参照光が干渉可能とすると、ホログラム面には振幅の絶対値の2乗が記録される。

$$h_{ll_2} = |W_o + W_R|^2$$

$$\begin{aligned}
&= |\operatorname{Re}(W_o) + \operatorname{Re}(W_R) + i\{\operatorname{Im}(W_o) + \operatorname{Im}(W_R)\}|^2 \\
&= |W_o|^2 + |W_R|^2 + 2 \operatorname{Re}(W_o W_R^*) \quad (6)
\end{aligned}$$

Re は実数部, Im は虚数部を, * は複素共役を意味している. 式(6)の第 1 項と第 2 項は像の再生には無効なものであり, ホログラムを形成するダイナミックレンジを無駄にするので, 省略し式(7)を得る.

$$\begin{aligned}
h_{112} &\approx \operatorname{Re}(W_o W_R^*) \\
&= A_R \sum_{l_1}^{L_1-1} \sum_{l_2}^{L_2-1} \psi P_{n_1 n_2} \quad (7)
\end{aligned}$$

ただし,

$$\psi = \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(r - y_l \sin \theta) + \phi_{n_1 n_2}\right)}{r}$$

式(7)を見ると, 物体光の振幅と位相項が積和される形式であるので, 行列表現が可能である.

$$\mathbf{h} = \Psi \mathbf{P} \quad (8)$$

ただし, A_R は, 参照光の振幅であり, 一定であるので, 省略した. ここで, \mathbf{h} は, ホログラムベクトルであり, \mathbf{P} は, 仮想物体の振幅ベクトルである. そして, Ψ は, 位相行列である.

2.4 計算式の統合

これまで計算した DCT の変換式と, CGH の変換式は, 式(3)と, 式(8)で示したようにどちらも行列表現が可能である. また, 行列 \mathbf{B} と Ψ はどちらも定数の行列である. 従って, 行列の掛け算によって統合することが可能である.

まず, DCT の変換式に, 基底ホログラムの重み係数を行列にした行列 Δ を掛ける. この行列をここでは“基底ホログラム量子化行列”と呼ぶことにする.

$$\mathbf{X} = \Delta^{-1} \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (9)$$

ただし,

$$\Delta^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_1^{-1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \delta_2^{-1} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & \delta_{N_1 \times N_2}^{-1} \end{bmatrix}$$

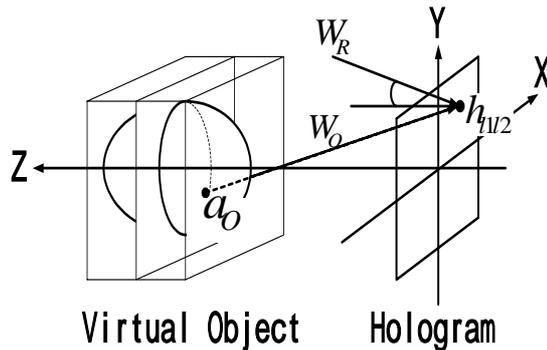


Fig.3 Modeling of CGH based on Frenel type hologram.

$$\delta = Q_{n_1 n_2} \times q$$

ここで, δ は量子化ステップ値であり, $Q_{m_1 m_2}$ は, (m_1, m_2) 番目成分の量子化ステップ値の基本値である. そして, q は量子化のレベル値であり, ここでの量子化レベルの値は任意に変化させることができ, これによって圧縮率の調整が可能となる.

2次元 DCT の逆変換の式は式(10)となる.

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}^T \Delta \mathbf{X} \quad (10)$$

ここで, \mathbf{B} が転置行列であるのは, DCT の基底は正規直交基底であるので, その逆行列と転置行列が等しくなるからである.

CGH での仮想物体の振幅値とは, DCT での 2次元画像の濃度値と等価なものと考えることができる. そこで, DCT の逆変換の式(9)と CGH の変換式(8)から行列 \mathbf{P} を消去し, 式(11)が得られる.

$$\mathbf{h} = \mathbf{G} \Delta \mathbf{X} \quad (11)$$

ただし,

$$\mathbf{G} = \Psi \mathbf{B}^T$$

ここで, \mathbf{G} は CGH の位相行列と, DCT の基底行列の掛け算, つまり, 基底ホログラムを表している. この行列の Ψ と \mathbf{B} は, どちらも定数行列であるため, あらかじめ計算が可能である.

3. 実験及び再生画像の評価

実際に, 本方法による情報圧縮したホログラムを生成し, どの程度の圧縮効果があるかを評価した. また, 計算機上の再生シミュレーションにより, 生成したホログラムの再生像を求め, その定量的評価を行った.

3.1 基底ホログラムの生成

まず、本方法の準備段階である、2次元 DCT の基底ホログラムを生成する。基底ホログラムを生成するというのはつまり、2次元 DCT の各成分の基底画像を再生するホログラムを生成することである。Fig.4 に基底ホログラムの一例として、DC 成分のものと、一番右下の AC 成分のものを示す。

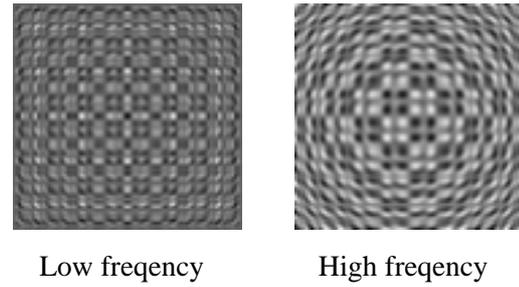


Fig. 4 Examples of Basis Hologram

3.2 サンプル画像による評価

始めに、画像を画像ブロックに分割した時の 1 ブロックに相当する、 8×8 画素の画像を数種類用意し、それぞれに対して、本方法によるホログラムを生成し、その再生画像を評価した。Fig.5 は、今回用意した 3 種類のサンプル画像である。(A)は高周波画像、(B)は低周波画像、(C)はランダム画像である。Fig.6 はそれぞれの画像に対し、情報圧縮したホログラムを生成した際に、式(9)における量子化レベル値 q の値を 0.0 から 2.0 まで増加させた時の、切り捨てられる基底ホログラム数との関係を示したものである。今回、量子化ステップ値の基準となる値は、JPEG で採用されている量子化テーブルを用いた。このテーブルの特徴としては、画像構成に重要な低周波側に、値を小さく、高周波側に向かうほど値を大きくとっている。

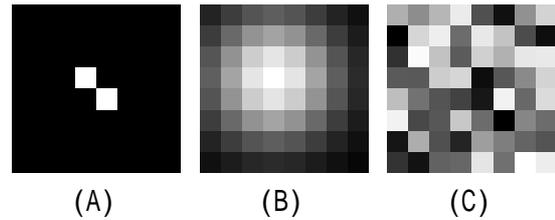


Fig.5 Sample image of three types

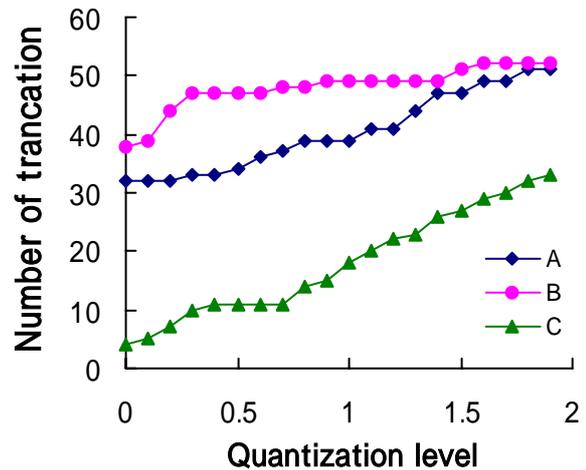


Fig.6 Relation between quantization level and number of truncation.

Fig.7 はそれぞれの量子化レベルで生成した、情報圧縮ホログラムを再生し、そのときの再生像と、通常ホログラムの再生像の比較である。なお、今回使用した、評価法は、PSNR(Peak Signal-to noise ratio)によるものである。以下に PSNR の式を示す。

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255}{RMSE} \right) \quad (12)$$

ただし、

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} [f_{n_1 n_2} - F_{n_1 n_2}]^2}{N_1 \times N_2}}$$

ここで、 $N_1 \times N_2$ は、画像の画素数、 $f_{n_1 n_2}$ は、元の画像濃度で、この場合は、通常ホログラムの再生画像濃度である。そして、 $F_{n_1 n_2}$ は、再生画像濃度である。

Fig.6 からわかる様に、全体的に、量子化レベルを増加させていくと、切り捨てられる

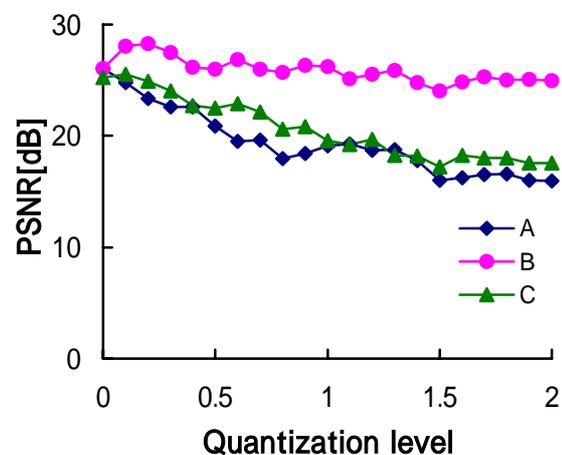


Fig.7 Relation between quantization level and PSNR.

基底ホログラムの数が増加し，すなわち圧縮率が高くなる．しかしながら，Fig.7 に示している様に，それに伴い再生像も劣化する．高周波成分の多い画像(A)や(C)のは，係数の成分が低周波側に集中せず，高周波側にも及ぶため，量子化レベルをある程度大きくしないと圧縮効果が期待できない．特に，タイプ(C)のような画像においては，再生のために多くの基底ホログラムが必要となるため，圧縮効果が低くなっている．しかし，タイプ(B)のような低周波の画像は，量子化レベルを小さくしても，高い圧縮効果が得られ，再生像の劣化も少ないことがわかる．

3.3 自然画像による評価

Fig.8 に今回使用した 64×64 画素の原画像 (lenna) と，その画像を，画像ブロックに分割したものを示す．Fig.9 は，Fig.8 で分割した画像ブロックそれぞれの位置に対して，量子化レベルが 0.5 の場合での，切り捨てられた基底ホログラム数を 3 次的に表したものである．グラフを見ると，画像ブロックの場所によって切り捨てた基底ホログラム数に差があることがわかる．高周波成分を多く含む画像ブロック，例えば髪の毛の部分では切り捨てられた基底数が比較的少ない．対して，低周波成分を多く含む画像ブロック，例えば顔の部分においては，切り捨てられた基底数は大きくなっている．なお，切り捨て可能な数は，最大のブロックで $59/64$ ，最小なブロックで $25/64$ であった．このように自然画像は，多数の画像ブロックで構成されており，様々な性質の画像ブロックが混在している．このため，画像ブロック毎にみれば，それぞれの圧縮量に差が生じる．しかしながら，一般に自然画像の多くは，画素間の相関性が高いとされているため，画像全体でみれば，低周波成分の割合が大きいことで，圧縮効果が期待できる．

用意した自然画像に本方法を適用したホログラムと，圧縮無しの方法で作成したホログラムの例を Fig.10 に示す．そして，量子化レベルをそれぞれ，0.5，1.0，1.5 と変化させた時の情報圧縮ホログラムの再生画像を Fig.11 に示す．生成されたホログラムの情報量は，それぞれ，約 $1/4$ ， $1/5$ ， $1/6$ ，に圧縮

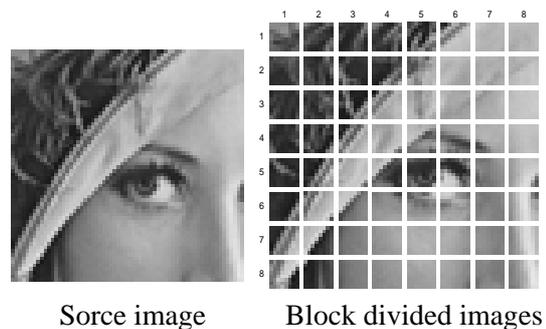


Fig.8 Source image and Block divided images.

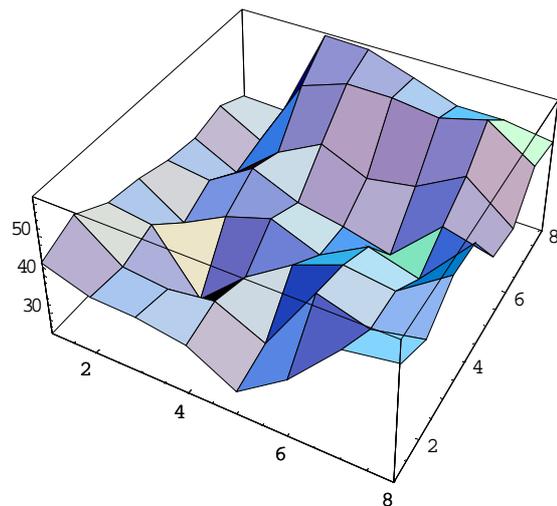


Fig.9 Distribution of number of truncated base hologram. Quantization level is assumed to be 0.5 in this case.

され，ホログラムの再生像とを比較した PSNR は，それぞれ，約 29.72[dB]，29.69[dB]，29.32[dB]であった．良好な再生像が得られたが，量子化レベル 1.0 以上の再生像にはブロック歪みが目立ってくる．これについては，画像ブロックを重複して変換する対策が考えられる．

4. まとめ

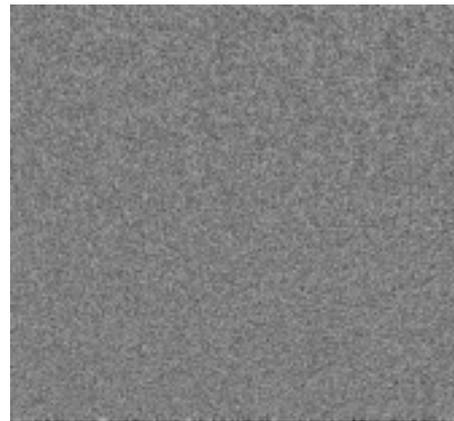
今回，2次元 DCT による CGH の新たな情報圧縮法を提示した．そして，その再生像の定量的評価を行った．DCT の基底は，固定基底であるので，その基底画像をホログラムに変換する，いわゆる基底ホログラムをあらかじめ計算しておくことが可能である．これが，本方法のアイデアであり，それによって，画像を再構成するのに適当な成分のみでホログラムを合成するので，その分の情報圧縮が可能となる．また，同一奥行きにある画像

ならば,64種類の基底ホログラムを用いて再現することが可能である.さらに,画像ブロック毎の並列処理が可能であり,数式は単純な積和演算の繰り返しによるもので,ハードウェア化も容易であり,高速化にも適していると考えられる.本方法により得られた再生像の評価の結果,1/4~1/6程度までは,良好な画質(PSNR \approx 29[dB])で圧縮できることを確認した.

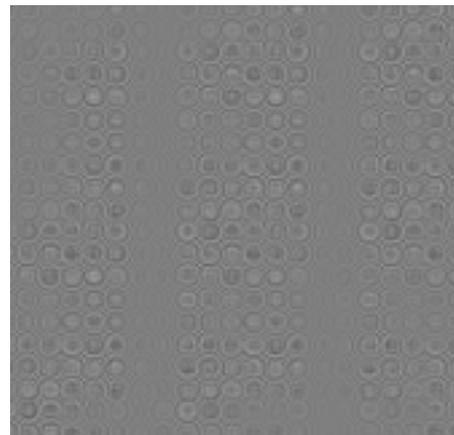
今後の課題としては,ホログラムの視域の拡大が挙げられる.

参考文献

- 1) M.Daibo, N.Tayama, "Visualization of x-ray computer tomography using computer generated holography," SPIE Proc, vol.3457, pp.134-145, 1998.
- 2) 大坊真洋, 田山典男, "計算機ホログラムとX線計算機断層法を統合した3次元可視化," 電子情報通信学会論文誌 D-, vol.J82-D-, no.9, pp.1420-1428, 1999.
- 3) M.Rabbani, P.W.Jones, "Digital Image Compression Techniques," SPIE PRESS, vol.TT7, pp.102-128, 1991.



(a)



(b)

Fig.10 Example of hologram (a) without compression and (b) with compression.



Without compression



Quantization level 0.5



Quantization level 1.0



Quantization level 1.5

Fig.11 Compression of reconstructed images.