

# デジタル光波データのデータサイズ削減手法

増地 将哉, 松島恭治, 棟安実治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

**概要:** 計算機合成ホログラムの技術発展により, 数 100 億ピクセル規模の高解像度 CGH が作成されるようになった. コンピュータホログラフィでは光波はデジタルデータとして扱われるが, そのデータサイズが莫大であるため, 保存やネットワークでの伝送が困難である. また, 光波データの保存・伝送を行う場合, 光波分布と干渉縞のどちらを扱うかという問題があるが, 汎用性の点で光波分布を扱う方が良い. そこで, 本研究では, 光波分布を振幅分布と位相分布に分け, 線形量子化または非線形量子化を行った時の再生像の影響を評価し, デジタル光波データのデータサイズ削減を試みた.

## 1. はじめに

コンピュータホログラフィでは, コンピュータ上で光波を数値合成し, 干渉縞パターンを求めることで高解像度計算機ホログラム(以下, CGH)を作成する. 近年では, 実物体の光波をイメージセンサによって電子的に記録するデジタルホログラフィ(以下, DH)によって 3 波長光波をコンピュータ上に取り込み, フルカラー高解像度 CGH によって再生することもできるようになっている。

コンピュータホログラフィでは, 光波はデジタルデータとして扱われるが, そのデータサイズは莫大であるため, 保存やネットワークでの伝送が困難である. また, 光波データの保存・伝送を行う場合, 光波複素振幅分布(以下, 光波分布)と干渉縞のどちらを扱うかが問題である. 干渉縞データは単なる 2 次元画像であるためデータサイズが小さいが, 再生システムを限定してしまうため, 汎用性の点で光波分布の方が利点大きい。

そのため, 光波分布の振幅分布に特異値分解を適用した圧縮手法が提案されているが<sup>2)</sup>, 特異値分解の処理時間が長く本格的な高解像度 CGH に適用することは困難と考えられる. また, 2K サイズ (1K=1024)の光波分布を k-means アルゴリズムを用いて非線形量子化しデータ量を削減した場合に再生像が受ける影響も検討されているが<sup>3)</sup>, 光波が高解像度 CGH としては小さすぎ, また評価対象の再生像も単純な逆回折で得られたものであり, 実際

人が像を見るときの結果再生像ではない。

そこで, 本研究では光波分布の振幅ヒストグラムが光波の種類やサイズに依存しないことに注目し, k-means アルゴリズムを用いて小さな光波データの非線形量子化を行い, 得られた量子化パラメータを用いて大きな光波データを量子化した時に再生像が受ける影響を調べた. またその結果から, 光波分布を 1 サンプル点あたり 4~16 ビットで量子化した場合に最適な振幅・位相量子化ビット数の組み合わせを調べ, 実際に高解像度 CGH を作製し確認を行った。

## 2. 量子化の手法

### 2.1 振幅分布のヒストグラムと正規化

本研究では, 1 サンプル点が実部・虚部二つの単精度浮動小数点数で表される複素振幅を振幅・位相形式に変換し, 線形または非線形量子化を行った。

振幅分布  $a(m,n)$  の最大値  $a_{\max}$  を用いて,

$$a'(m,n) = \frac{a(m,n)}{a_{\max}} \quad (1)$$

として正規化を行い, 正規化後の振幅分布  $a'(m,n)$  で求めたヒストグラムの一例を図 1 に示す. このヒストグラムから分かるように, 一般に光波分布の振幅分布には偏りがあり, このまま線形量子化を行うと量子化誤差が大きくなってしまう. そこで, サンプル点の上位  $\alpha$  [%] を無視して出現確率の高い範囲を [0,1] の範囲に正規化するため,

$$N_{\text{total}} \times \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \leq \sum_{i=0}^{i'} R_i \quad (2)$$

の条件を満たす最小の階級  $i'$  を求める。ここで、 $N_{\text{total}}$  はサンプル点の総数であり、 $R_i$  は  $[i/100, (i+1)/100]$  の階級に含まれるサンプル点の数を表している。この  $i'$  の値を用いて、

$$\hat{a}(m, n) = \frac{a'(m, n)}{i'/100} \quad (3)$$

として再び正規化を行なった。ここで、本研究では  $\alpha = 0.1[\%]$  としている。

## 2.2 線形量子化の手法

振幅分布の線形量子化には次式を用いた。

$$a_q(m, n) = \begin{cases} \text{round}(\hat{a}(m, n) \times Q_a) \times \frac{1}{Q_a - 1} & \Delta \hat{a}(m, n) \leq 1 \\ 1 & \Delta \hat{a}(m, n) > 1 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\text{round}(\zeta)$  はその値を最も近い整数値に丸める関数、 $Q_a$  は振幅値の量子化レベル数である。同様に、位相分布の線形量子化には次式を用いた。

$$\phi_q(m, n) = \text{round}\left(\frac{[\phi(m, n) + \pi] \times Q_p}{2\pi}\right) \times \frac{2\pi}{Q_p} - \pi \quad (5)$$

ここで、 $Q_p$  は位相値の量子化レベル数である。

## 2.3 非線形量子化の手法

図1に示すように、光波分布の振幅分布には偏りがある。そこで、k-means アルゴリズムにより<sup>4)</sup>、量子化パラメータ(量子化閾値と量子化代表値)の最適化を行った。

k-means アルゴリズムでは、まずサンプル値  $y_n (n=1, K, N)$  を初期のクラスタ  $S_i (i=1, K, K)$  に割り振る。ここで、 $N$  はサンプリング数であり、 $K$  はクラスタの数である。その後、クラスタ  $S_i$  の代表値  $q_i (i=1, K, K)$  と、閾値  $x_i (i=1, K, K)$  を決定する。次に、クラスタの閾値  $x_i$  と代表値  $q_i$  を以下の式を用いて更新する。

$$q_i = \frac{1}{s_i} \sum_{j=1}^{s_i} y_{i,j} \quad (6)$$

$$x_i = (q_{i+1} + q_i) / 2 \quad (7)$$

ここで、 $s_i (i=1, K, K)$  はクラスタ  $S_i$  に含まれるサン

プル値の総数であり、 $y_{i,j} (i=1, K, K, j=1, K, s_i)$  は、クラスタ  $S_i$  に含まれる  $j$  番目のサンプル値である。

この更新を反復し、一定の値に収束したところで量子化パラメータの最適化を終了する。

## 3. 量子化した光波の評価

### 3.1 用いた物体モデルと評価方法

本研究で用いた物体モデルと座標系を図2に示す。また、求めた光波のパラメータを表1に示す。ここで、図2(a)と(b)はポリゴンモデルでありその光波分布はポリゴン法によって数値合成したものである<sup>5)</sup>。一方(c)では、3Dプリンタにより作製した実物体の光波を合成開口DHによって記録し、それを100mm伝搬したものである。これらの光波分布は、量子化によってデータサイズ削減した後に結像再生シミュレーションで像を再生し<sup>6)</sup>、同じ方法で再生した原光波の再生像との類似性をPSNRにより評価した。

### 3.2 量子化した光波の再生像の評価

Bunnyの光波分布の振幅分布のみを量子化したときの数値再生像のPSNRを図3に示す。振幅量子化ビット数が5付近のときを除いて、k-means アルゴリズムによる非線形量子化の方が線形量子化よりもPSNRが高いことがわかる。

また、同様にBunnyの位相分布のみを量子化したときの数値再生像のPSNRを図4に示す。位相分布には偏りがほぼないため線形量子化のみを行った。PSNRは位相量子化ビット数に対して単調に増加することがわかる。

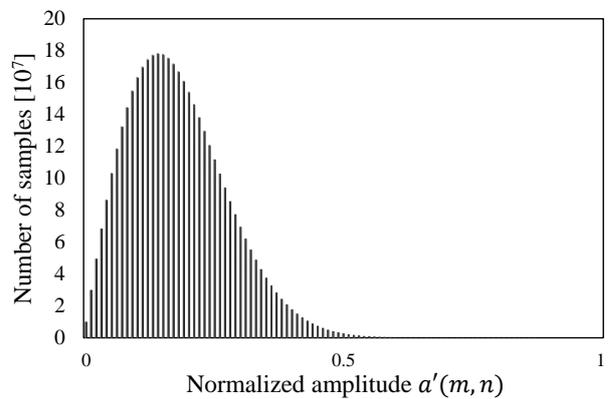


図1 振幅分布のヒストグラム

表1 光波のパラメータ

	Bunny	FiveRing	Vase
Number of samples	65,536 × 65,536	65,536 × 65,536	32,768 × 32,768
Sampling interval	0.8 μm × 0.8 μm	0.8 μm × 0.8 μm	1.0 μm × 1.0 μm
Wavelength	632.8 nm	630 nm	632.8 nm

#### 4 非線形量子化パラメータの汎用性

様々なタイプの光波分布の振幅分布で2.1節に示した正規化を行い、階級数 100 としてヒストグラムを求めた結果を図5に示す。ここで、(A)と(B)はそれぞれ Bunny と FiveRing の光波分布(モノクロ、サンプル点数 64K×64K)、(C)がカラーCGH用の3波長の光波分布(64K×64K)<sup>7)</sup>、(D)が点光源で計算したワイヤフレームモデルの光波分布(64K×64K)、(E)が DH で記録した実物体の光波分布(32K×32K)である。いずれの光波分布でも振幅分布のヒストグラムはほぼ同じであるため、どの場合も量子化パラメータはほぼ同じ値に収束すると予想される。一方、大規模な光波で k-means アルゴリズムを用いて量子化パラメータを完全に収束させるには長い計算時間が必要である。そこで本研究では、小規模な光波で最適化した量子化パラメータを大きさや種類の異なるすべての光波に適用することを試みた。

Bunny の 4K×4K サイズ光波分布の振幅分布に対して、k-means アルゴリズムを用いて最適化した量子化パラメータ(量子化閾値と量子化代表値)を用いて Vase の 32K×32K サイズ光波の振幅分布を量子化した場合の PSNR を図6に示す。この図には元の 32K×32K サイズ光波自体で量子化パラメータを最適化した場合の PSNR も示してある。PSNR の値がほぼ変わらないことから、量子化パラメータには高い汎用性があることがわかる。

#### 5 光波分布サンプル値のコード化

図7に示すように光波分布の1サンプル点を  $N_t$  ビットでコード化することを考えた。 $N_t$  ビットのうち  $N_a$  ビットで振幅値を表し、残りの  $N_p$  ビットで位相値を表すことにする。64K×64K サイズの Bunny と 32K×32K サイズの Vase の光波分布を  $N_t=4, 6, 8, 16$  ビットでコード化した時の PSNR をそれぞれ図8と図9に示す。ここで、振幅分布の非線形量子化に用いた量子化パラメータは、先ほどと同様に、

4K×4K サイズの Bunny で求めたものである。これらの図では、横軸は振幅量子化ビット数  $N_a$  であり、位相量子化ビット数は  $N_p = N_t - N_a$  である。

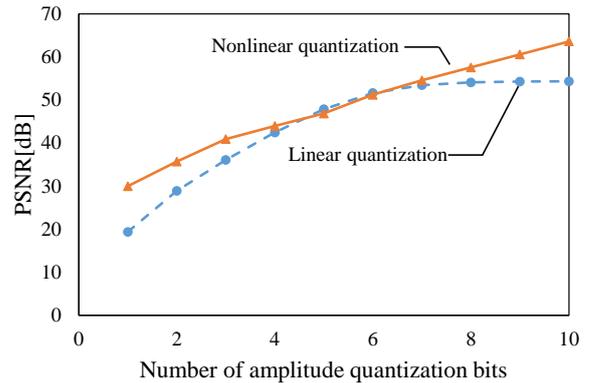


図3 振幅量子化ビット数に対する PSNR

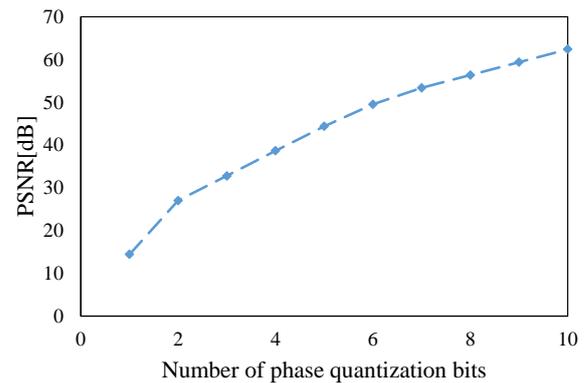


図4 位相量子化ビット数に対する PSNR

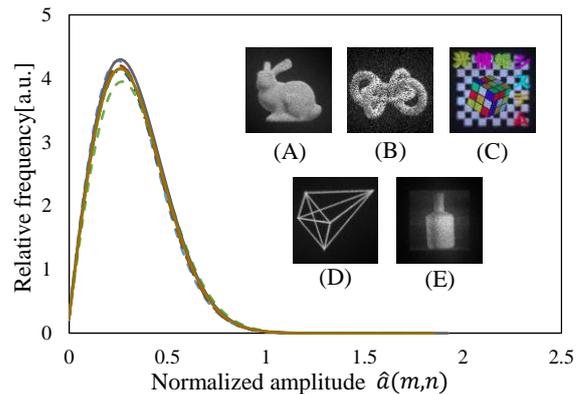


図5 様々な光波の振幅ヒストグラム

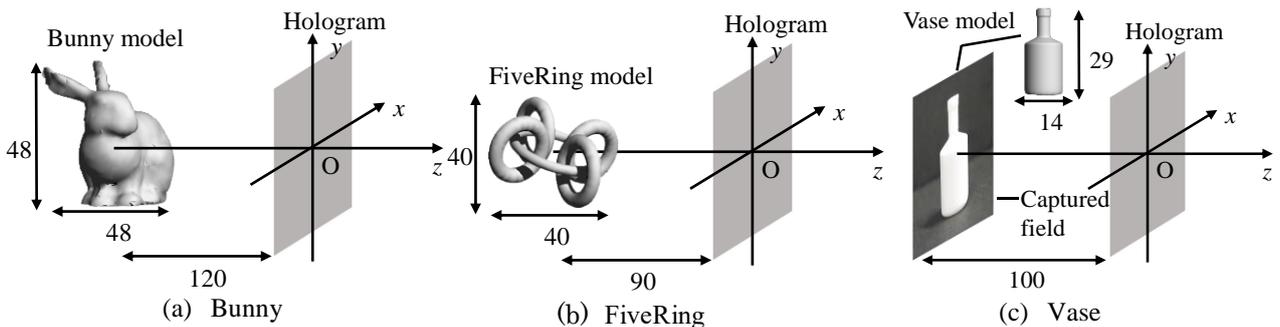


図2 用いた物体モデルと座標系 (単位:mm)

また、実線は振幅を非線形量子化した場合、破線は線形量子化した場合であり、位相は常に線形量子化している。いずれの場合も、1 サンプル点を 1 バイトでコード化( $N_t = 8$ )しても、振幅を 3 ビットで非線形量子化し、位相を 5 ビットで線形量子化すれば、40dB 以上の高い PSNR が得られることがわかる。

そこで、これらのビット数でコード化した光波および原光波分布を用いて実際に CGH を作製した。作製した CGH のパラメータを表 2 に、その光学再生像を図 10 に示す。8 ビット/サンプル点でコード化した場合の再生像(B)は原光波の再生像(A)に比べて遜色ない結果となった。

6 まとめ

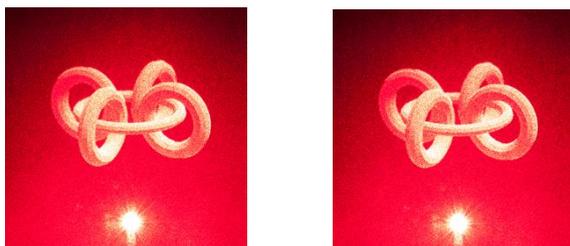
光波分布の振幅分布を線形・非線形量子化、位相を線形量子化し、デジタル光波データのデータサイズ削減を行い、再生像が受ける影響を評価した。また実際に CGH を作製し確認を行った。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15K00512, および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年~平成 29 年)の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) K. Matsushima, N. Sonobe, Appl. Opt. in press.
- (2) M. Liji, M. Muneyasu, K. Matsushima, S. Yoshida, and A. Taguchi, SISA 2017, RS2-7(2017).
- (3) A. Arrifano, M. Antonini, and M. Pereira, Proc. European Workshop on Visual Information Processing, 232-237 (2013).
- (4) S. P. Lloyd, IEEE Transactions on Information Theory, **IT-28**, 129-137 (1982)
- (5) K. Matsushima, Appl. Opt. **44**, 4607-4614(2005).
- (6) 村上和也, 松島恭治, 映情学誌 **65**, 1793-1800 (2011).
- (7) Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, Opt. Express **25**, 2016-2030 (2017).



(A) 原光波 (B) コーディングした光波 ( $N_a = 3, N_p = 5$ )  
 図 10 作製した CGH の光学再生像

表 2 作製した CGH のパラメータ

Number of pixels	65,536 × 65,536
Pixel pitches	0.8 μm × 0.8 μm
Size of a CGH	52.4 mm × 52.4 mm
Wavelength	630 nm

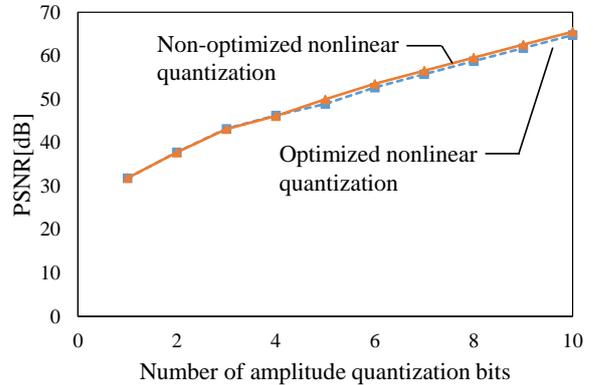


図 6 最適化した場合と最適化せずパラメータを流用した場合の非線形量子化の比較

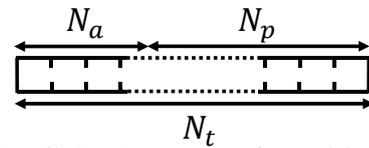


図 7 複素振幅値のコーディング方法

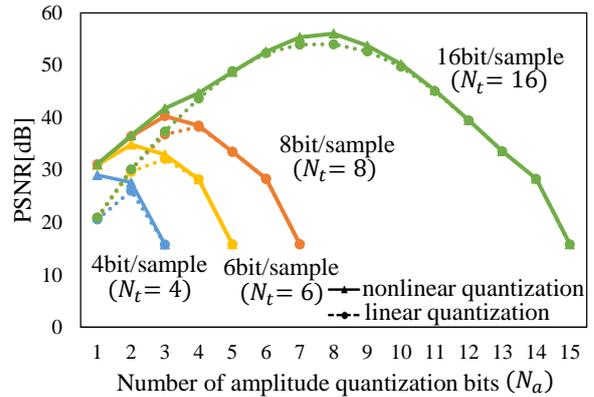


図 8 コーディングビット数に対する PSNR(FiveRing)

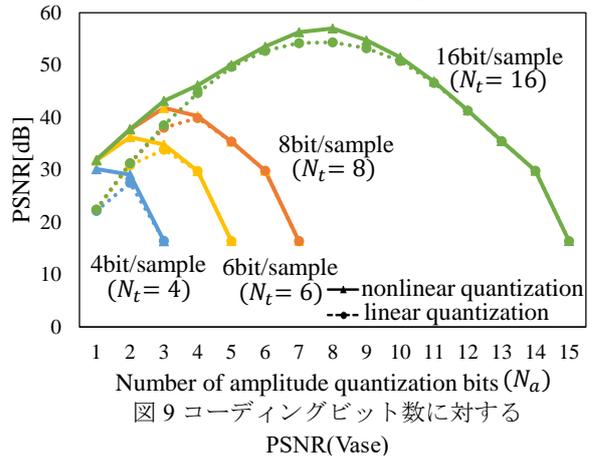


図 9 コーディングビット数に対する PSNR(Vase)