線形・非線形量子化による光波データ量の削減
Reduction of wave-field data-size by using linear and nonlinear quantization techniques

増地将哉　松島恭治　棟安実治
Shoya Masuji　Kyoji Matsushima　Mitsuji Muneyasu
関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

ABSTRACT
High-definition computer-generated holograms (CGH) composed of several tens of billion pixel have a large amount of data. As a result, storage and transmission of the data are very difficult in these CGHs. In this paper, a technique using linear and nonlinear quantization is presented for data size reduction of object wave-fields. Influence of quantization on the reconstructed images is evaluated by simulated reconstruction.
Keywords: コンピュータホログラフィ，デジタルホログラフィ，計算機合成ホログラム，量子化

1. はじめに

コンピュータホログラフィでは，光波をコンピュータ上で数値的に処理し，干渉縞パターンを求めることによって高解像度の計算機合成ホログラム(以下，CGH)を作成する．近年では，デジタルホログラフィ(以下，DH)によって記録した 3 波長光波をコンピュータ上に取り込み，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た[1].

コンピュータホログラフィでは，光波はすべてデジタルデータとして取り扱われるため，デジタル媒体への保存や, ネットワークでの伝送が可能である．しかし，特に 3D 映像用途ではその情報量が巨大であるため，そのデータの取り扱いは容易でない．

この種の研究としては，昨年，光波複素振幅分布(以下, 光波分布)ではなく, ホログラム干渉縞の圧縮が報告されているが，単にバイナリ画像をビット単位でバイトデータにパッキングしたに過ぎず，圧縮にはなっていない[2]．また，干渉縞での圧縮は再生時の照明光など再生システムを限定することになり，汎用性に欠ける問題がある．

そこで本研究では，干渉縞ではなく，光波分布において，振幅と位相に線形・非線形量子化を適用した場合に再生像が受ける影響について調べた．

2. 量子化の手法

2.1 正規化とヒストグラム

本研究では，1 サンプル点が二つの単精度浮動小数点数で表される光波分布を振幅分布と位相分布に分け，線形または非線形量子化を行った．

ここで，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 Fig.1 に示す．このヒストグラムは階級数を 100 として求めたものである．Fig.1 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る．そこで，サンプル点の上位 α [%] を棄却して出現確率の高い範囲を[0,1] に正規化するため,

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

の条件を満たす最小の階級 i' を求める．ここで, N_{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

増地将哉
<masuji@laser.ee.kansai-u.ac.jp>
関西大学システム理工学部電気電子情報工学科
〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35
TEL 06-6368-1121(内線 5722)

数を表している．この i' の値を用いて，

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

として再び正規化を行ない，振幅値が 1 以上となった $\alpha N_{\mathrm{total}}$ 個のサンプル点を棄却し，[0,1] の振幅値の出現確率分布の偏りを小さくしている．なお，本研究では $\alpha = 0.1\,[\%]$ としている．

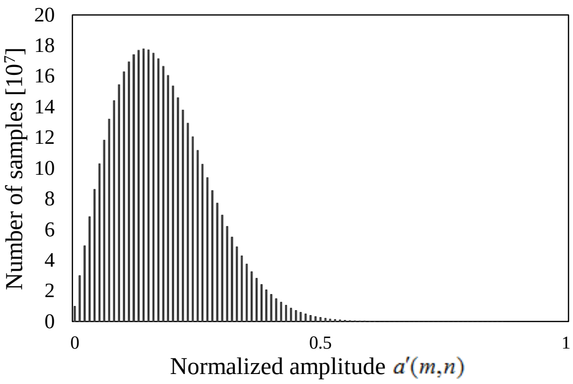


Fig.1 Histogram of amplitude distribution.

2.2 線形量子化の手法

線形量子化には次式を用いた．

$$a_q(m,n) = \begin{cases} \mathrm{round}(\hat{a}(m,n) \times Q_a) \times \dfrac{1}{Q_a - 1} & \hat{a}(m,n) \le 1 \\ 1 & \hat{a}(m,n) > 1 \end{cases} \tag{4}$$

ここで， $\mathrm{round}(\zeta)$ 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．

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

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

Fig.1 に示したように，光波分布の振幅値には偏りがある．そこで，本研究では，Lloyd アルゴリズム[3]により，以下に示す手順で非線形量子化を行った．

(i) サンプル値 $y_n (n=1,\quad ,N)$ を初期のクラスタ $S_i (i=1,\quad ,K)$ 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．すなわち，クラスタ S_i の代表値 $q_i (i=1,\quad ,K)$ と，境界値 $x_i (i=1,\quad ,K)$ を決定する．

(ii) 求めたクラスタの境界値 x_i と，代表値 q_i を用いて，サンプル値 y_n を量子化する．すなわち，サンプル値 y_n に対して，

$$x_i \le y_n < x_{i+1} \tag{6}$$

を満たす i を求める．

(iii) 量子化後のサンプル値 y'_n と，元のサンプル値 y_n との二乗誤差

$$\varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{i=n}^{N} (y_n - y'_n)^2 \tag{7}$$

を求め， 1 つ前の反復処理における二乗誤差 ε' との差の相対値 $\Delta\varepsilon = |\varepsilon - \varepsilon'|/\varepsilon$ を求める．

(iv) $\Delta\varepsilon$ がある値以下なら，終了する．そうでないなら，クラスタの境界値 x_i と，代表値 q_i を以下の式を用いて更新する．

$$q_i = \frac{1}{s_i}\sum_{j=1}^{s_i} y_{i,j} \tag{8}$$

$$x_i = (q_{i+1} + q_i)/2 \tag{9}$$

ここで， $s_i (i=1,\quad ,K)$ はクラスタ S_i に含まれるサンプル値の総数であり， $x_{i,j} (i=1,\quad ,K, j=1,\quad ,s_i)$ は，クラスタ S_i に含まれる j 番目のサンプル値である．

本アルゴリズムでは(ii)から(iv)の手順を反復する．なお，本研究では $\Delta\varepsilon \le 0.01$ で終了とした．

3. 量子化した光波の評価

3.1 物体モデル

本研究で用いた光波を求めた物体モデルと座標系をFig.2に示し，また光波のパラメータをTable.1に示す．ここで，Fig.2(a)のモデル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．一方，Fig.2(b)のモデルの光波分布は，これを3Dプリンタにより実在物として作製し，合成開口DHにより記録したもの

Table 1 Parameters of the object field.

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

である．これらの光波分布は，量子化によってデータ量削減した後にシミュレーション再生して[4]，その再生像の画質評価を行った．

3.2 PSNRによる画質評価

本研究では，画質評価の指標として PSNR を用いた．PSNR は平均二乗誤差 MSE を用いて以下の式で表される．

$$MSE = \frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}\left[I(i,j) - I_q(i,j)\right]^2 \tag{10}$$

$$PSNR = 10\log_{10}\frac{I_{\mathrm{MAX}}^2}{MSE}\,[\mathrm{dB}] \tag{11}$$

ここで，$\hat{I}(i,j)$ は量子化していない原光波の数値再生像の強度値を，2.1 節で述べた振幅値の正規化方法と同じ方法で正規化した値であり，$\hat{I}_q(i,j)$ は，量子化後の光波の数値再生像の強度値を正規化した値である．また，$I_{\max}$ は数値再生像の強度の最大値である．なお，評価範囲は像の周辺に限定している．

4.　量子化した光波分布の評価

Fig.2(a)のモデルの原光波分布の振幅分布のみを量子化した光波の数値再生像の PSNR を Fig.3 に示す．振幅量子化ビット数 5 ビット付近を除いて，Lloyd アルゴリズムによる非線形量子化のほうが線形量子化よりも PSNR が高いことがわかる．1 ビット振幅量子化した光波の数値再生像を Fig.4 に示すが，この画像サイズでは明瞭な違いがわからない結果となっている．

同じ原光波について，振幅分布は変更せず，位相分布のみを線形量子化したときの PSNR を Fig.5 に示す．位相分布には偏りがほとんどないため線形量子化を行っている．PSNR は量子化ビット数に対して単調に増加することが分かる．

また, 同じ光波の振幅分布を 1,4,8 ビットで非線形量子化し，位相分布を 1～10 ビットで線形量子化したときの PSNR をまとめた結果を Fig.6 に示す．

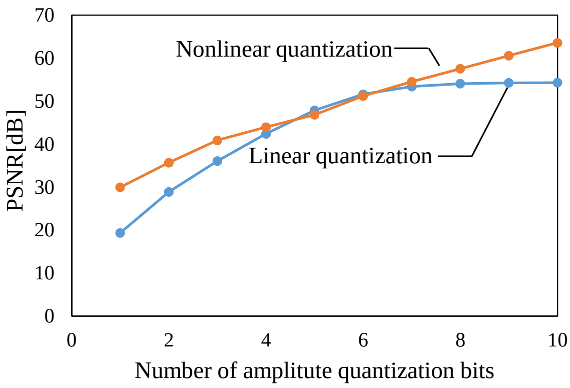
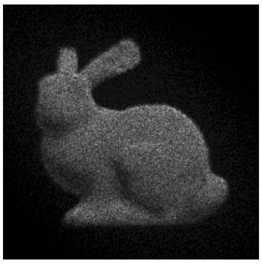
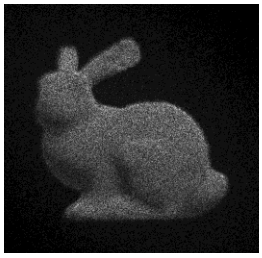


Fig.3　PSNR for amplitude quantization bits.



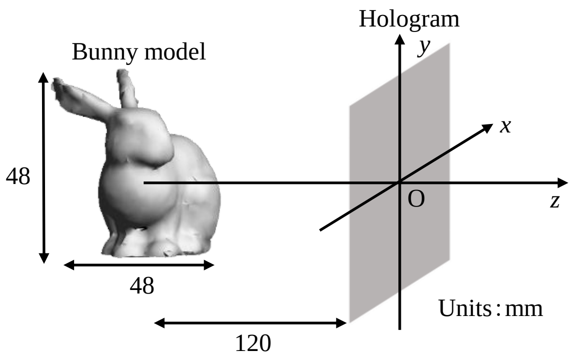
(a)　Original

(b)　Linear quantization

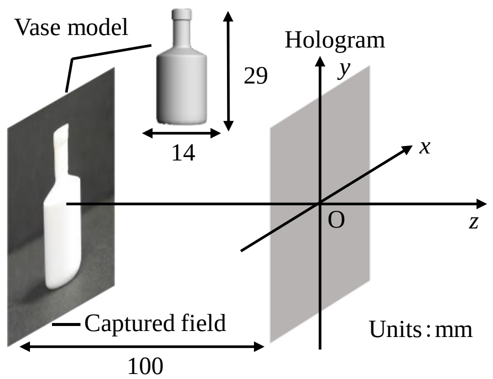


(c)　Nonlinear quantization

Fig.4　Simulated reconstruction of object fields.



(a)　Bunny



(b)　Vase

Fig.2　3D scene used for generating object fields.

5. 非線形量子化パラメータの汎用性

以下のような様々な光波の振幅分布のヒストグラムを調べた．(A)ポリゴン法で計算した Fig2(a)のモノクロ bunny の光波分布，(B)カラーCGH 用の 3 波長の光波分布[5]. (C)点光源で計算したワイヤフレームモデルの光波分布，(D)3D プリンタで Fig.2(b)の Vase の実在物を作成し，DH で記録した光波分布．以上の振幅分布を 2.1 節の方法で正規化したヒストグラムを Fig.7 に示す．いずれの光波でもヒストグラムの分布はほぼ同じであることがわかる．これより，Lloyd アルゴリズムによって得られた量子化パラメータ（クラスタ S_i の代表値 q_i と境界値 x_i）は，どのような光波分布データに対しても適用できると考えた．

そこで, (A)の 4K×4K サイズ原光波分布で，Lloyd アルゴリズムを用いて最適化した 3 ビット非線形量子化パラメータ(Table.2)を用いて(D)の光波分布の振幅値を量子化した場合と，この光波用に最適化した量子化パラメータを用いた場合の PSNR の比較を Fig.8 に示す．PSNR の値が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と考えられる．

6. まとめ

光波分布の線形・非線形量子化を評価し，データ量削減と量子化パラメータの汎用性を確認した．

7. 謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費（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] 園部徳晃，土山泰裕，松島恭治: Optics & Photonics Japan 2016, 1pP26 (2016).

[2] 前田，藤原，庭瀬，荒木，猪川，中山，角江，下馬場，伊藤，高田: 3 次元画像コンファレンス 2016, P-8 (2016).

[3] S. P. Lloyd, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.IT-28 (1982)

[4] 村上和也，松島恭治: 映像情報メディア学会誌 **65,** 12, 1793-1800 (2011)

[5] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, Optics Express **25,** Issue 3, 2016-2030 (2017).

Table 2 The quantization parameters (3bit).

Quantized values	
	q_1=0.158362, q_2=0.331872, q_3=0.505455, q_4=0.722513
Partitions	
	x_1=0.245117, x_2=0.418663, x_3=0.613984, $x_3=\infty$

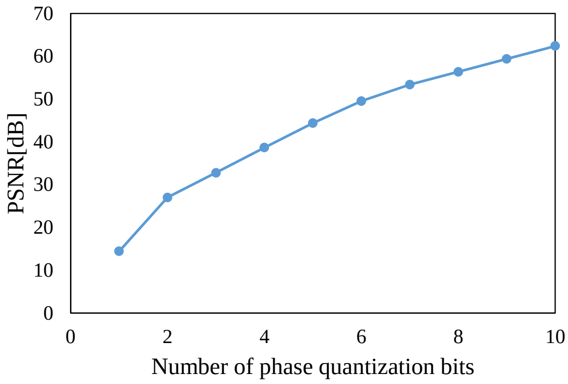


Fig.5 PSNR for phase quantization bits.

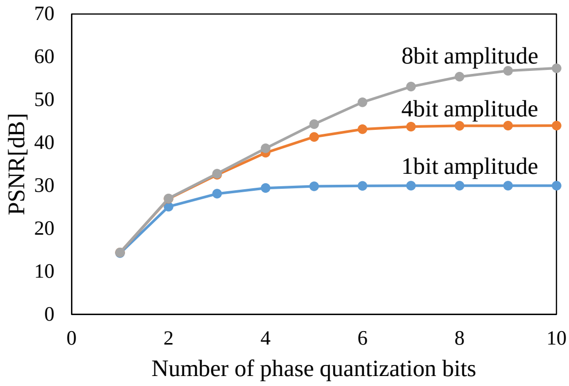


Fig.6 PSNR for amplitude and phase quantization bits.

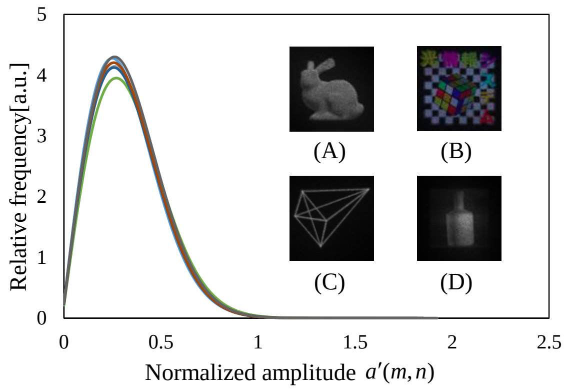


Fig.7 Histograms for various object fields.

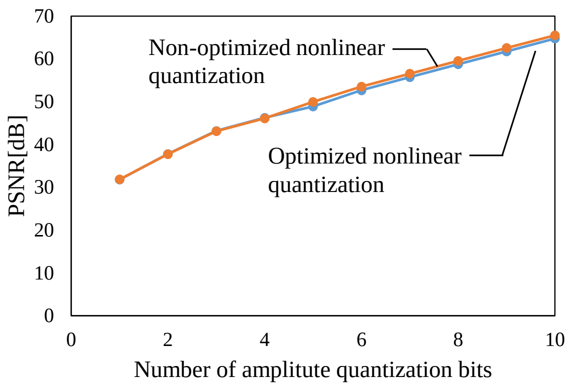


Fig.8 Comparison between nonlinear amplitude quantization with and without optimization.