

# デジタルホログラフィにおける撮像素子の 量子化による測定誤差の検討

中山 朋子<sup>1</sup>, 水野 潤<sup>1</sup>, 渡邊恵理子<sup>1, 2</sup>, 小舘香椎子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>日本女子大学理学部 数物科学科

<sup>2</sup>独立行政法人 科学技術振興機構 さきがけ

(2008年11月12日受理)

**要 旨** 光デバイスや生体細胞などの無色透明な微小位相物体の定量的測定を目的として、位相シフトデジタルホログラフィを用いた計測システムを提案し検討を行ってきた。デジタルホログラフィでは有限の階調を持つ撮像素子により干渉縞を記録し、数値計算による再生を行う。微小な位相変化を持つ試料の位相変化量を定量的に計測するため、撮像素子により量子化された干渉縞を用いて再生される像の強度と位相の誤差について検討を行った。測定試料として強度が均一で位相が変化するものおよび強度も位相も変化するものを対象として検討を行った結果、再生像の強度と位相の誤差の標準偏差は量子化数が大きくなるにつれて小さくなることを確かめた。また、試料の強度が変化する場合、強度が大きいほど誤差は大きくなり、逆に、位相の誤差は小さくなることが分かった。さらに、ホログラムの強度のヒストグラムを比較し、量子化ビット数の影響が元画像に依存する理由を推測した。

**キーワード**：位相シフトデジタルホログラフィ、撮像素子、CCD、量子化、測定誤差

## 1. はじめに

生物分野、医療分野等では、生体細胞など透明な位相物体の測定に蛍光剤で染色した特定の分子がどこに局在するか強度情報を得る蛍光顕微鏡や、位相差を強度に変換し相対的な位相分布を求める位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡が用いられている。染色により細胞がダメージを受ける場合があることや、より多くの情報を得たいとする理由から、非接触・非侵襲で高精度で定量的な位相計測が求められている。

その方法の一つとして、我々はマッハ・ツェンダー型干渉計に閉フィードバック制御を導入した無色透明な位相物体の微小領域における高精度な位相計測システムを提案・構築している<sup>1-3)</sup>。干渉計の一方のビームに測定試料を挿入し、屈折率変化のある方向にスキャンを行い、参照光との干渉光の強度変化を検出し位相変化を求める。この方法は高精度であるが、一点で測定するため、2次元の位相分布を得るには2次元スキャンが必要となり、

測定に時間を要する。そこで、より高速で簡易な計測を行うため、デジタルホログラフィを用いた位相計測システムを構築した。

デジタルホログラフィはCCDなどの撮像素子により干渉縞を記録し、数値計算による再生を行う<sup>4)</sup>。そのため、アナログのホログラフィのような写真乾板の現像・定着の作業が不要であり、また、数値計算により再生するため再生像はデジタルデータであり、強度情報だけではなく位相情報を利用可能である。

しかし、デジタルホログラフィで記録に用いるCCDなどの撮像素子は写真乾板に比べ解像度が低く、物体光と参照光がほぼ平行となるインライン光学系が要求される。そのため直接光と位相共役像を角度分離することができない。この問題は参照光の位相を変えた複数のホログラムを取得することで解決することができ、この手法を位相シフトデジタルホログラフィ<sup>5)</sup>という。

また、CCDにより取得されるホログラムの強度画像は量子化されるため、量子化誤差を伴う。したがって、再生された像についても量子化誤差に起因する誤差を含むものと考えられる。微小な位相変化を持つ試料を計測

するためにはわずかな測定誤差も測定精度に影響を与えるので、この点を明らかにするために量子化された干渉縞により再生された強度と位相の誤差について検討を行った。すでに、位相シフトデジタルホログラフィの量子化による再生像の強度における影響についてシミュレーションと実験により検討が行われている<sup>6)</sup>。本論文では位相物体の測定を目的とし、CCDの量子化に関してシミュレーションで検討を行った。サンプルとして強度が均一で位相が変化する試料と強度と位相が変化する試料について、それらの再生像の強度と位相を検討した。

第2章では位相シフトデジタルホログラフィの原理を述べる。第3章では量子化の影響を調べるアルゴリズムについて述べる。第4章の第1節では強度が均一で位相が $-\pi \leq \phi < \pi$ の範囲でリニアに変化するものを測定試料とし、強度と位相の測定誤差について検討を行った。第4章の第2節では試料の強度変化が強度と位相の測定誤差に影響を与えるか調べるため、強度が階段状に変化し、位相が同じく $-\pi \leq \phi < \pi$ の範囲で変化するものを試料とし検討した。第4章の第3節では両者の結果の比較を行った。最後に第5章をまとめとする。

## 2. 位相シフトデジタルホログラフィの原理

### 2.1 位相シフト法

位相シフトデジタルホログラフィの光学系を Fig. 1 に示す。この原理説明のために、マッハ・ツェンダー干渉計を組み、入射光をビームスプリッター1により分け、一方の光路を参照光とし、もう一方の光路に試料を置き物体光とする。ビームスプリッター2により参照光と物体光を干渉させる。参照光の位相を変化させるためにミラー1の位置を制御する。制御には電圧を加えると伸縮するピエゾ素子 (PZT) を用いる。

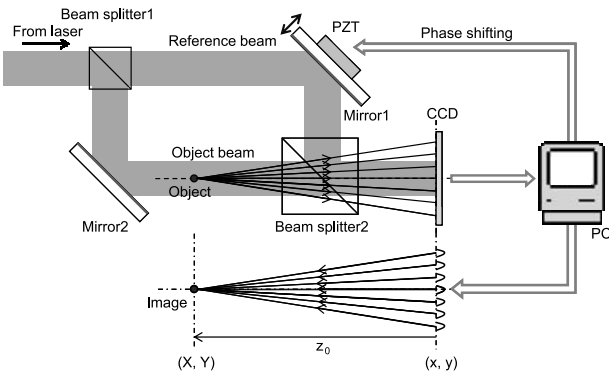


Fig. 1 Optical setup of phase-shifting digital holography.

物体光の複素振幅  $U_{obj}$  と参照光の複素振幅  $U_{ref}$  の干渉による強度分布  $I$  は、ミラー1により与えられる参照

光の相対位相  $\phi$  を用いて次のように表せる。

$$\begin{aligned}
 I(x, y, \phi) &= |U_{obj}(x, y) + U_{ref}(x, y) \exp(i\phi)|^2 \\
 &= |U_{obj}|^2 + |U_{ref}|^2 + U_{obj} U_{ref}^* \exp(-i\phi) \\
 &\quad + U_{obj}^* U_{ref} \exp(i\phi)
 \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) の第1項と第2項は直接光、3番目の直接像、4番目の項は共役像を表す。

異なる  $\phi$  を持つ3つ以上の強度分布を取得すると、直接光と共役像を除くことができる。例えば  $\phi = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$  の場合、それぞれ位相シフト量  $\phi$  の強度分布を  $I(x, y, \phi)$  とすると、式 (1) の第3項に含まれる直接像  $I_{int}$  は次の式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 I_{int}(x, y) &= U_{obj}(x, y) U_{ref}^*(x, y) \\
 &= \frac{1}{4} \{ [I(x, y, 0) - I(x, y, \pi)] \\
 &\quad + i [I(x, y, \pi/2) - I(x, y, 3\pi/2)] \}
 \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) より分かるように、参照光  $U_{ref}$  を平行光とすれば、物体光の CCD 面上 ( $z=z_0$ ) での複素振幅  $U_{obj}$  を算出できる。

### 2.2 再生の原理

式 (2) で得られた CCD 面上 ( $z=z_0$ ) での複素振幅  $U_{obj}$  を使い、 $z=0$  における物体光の複素振幅  $U_{img}$  を数値計算し再生像を得る。再生像の算出にはフレネル・キルヒホッフの回折積分を近似したフレネル変換を用いた。フレネル変換は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 U_{img}(X, Y, Z) &= \frac{1}{i\lambda Z} \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \left[ \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda} (X-x)^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda} (Y-y)^2 \right\} U_{obj}(x, y) \right] \\
 &= \frac{2\pi}{i\lambda Z} \exp\left\{ i \frac{\pi}{\lambda Z} (X^2 - Y^2) \right\} \\
 &\quad \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} dy \left[ \exp\left\{ -i \left( \frac{2\pi X}{\lambda Z} x + \frac{2\pi Y}{\lambda Z} y \right) \right\} \right. \\
 &\quad \left. \exp\left\{ i \frac{\pi}{\lambda Z} (x^2 - y^2) \right\} U_{obj}(x, y) \right]
 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $k=2\pi/\lambda$  は波数、 $\lambda$  は波長、 $a$  と  $b$  はそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸方向の有効な開口である。

また、式 (3) の積分は2次元のフーリエ変換を示している。 $\exp[i\pi(x^2+y^2)/\lambda Z] U_{obj}(x, y)$  という関数の  $(x, y)$  領域から  $(2\pi X/\lambda Z, 2\pi Y/\lambda Z)$  領域へのフーリエ変換で、FFT アルゴリズムを用いることで高速な演算が可能となる。

### 3. CCD によるホログラムの量子化の検討

CCD によるホログラムの量子化により生ずる測定誤差を推定する。試料の強度に変化がある場合、測定誤差による影響と量子化数を増やすことによる画質向上が可能な試料の確認のため、受光 CCD によるホログラムの量子化の検討を行った。

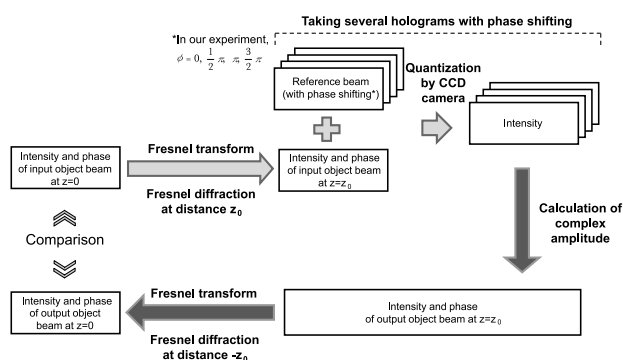


Fig. 2 Algorithm for the investigation of quantization effect.

Fig. 2 に今回作成した「量子化検討プログラム」のアルゴリズムを示す。まずはじめに、距離  $z=0$  での物体（測定試料）の強度と位相を決める。次に、この物体の CCD 面上 ( $z=z_0$ ) のフレネル回折像をフレネル変換を用いて算出する。さらに、この CCD 面上でのフレネル回折像（物体光）に平面波である参照光の位相を  $\phi = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$  と変化させ加える。CCD で取得される強度分布は量子化されるので、同様に  $\phi$  に依存した強度分布（ホログラム）を量子化する。その後、式 (2) によりホログラムから CCD 面上での物体光の複素振幅のみを算出する。次に、CCD 面上 ( $z=z_0$ ) での物体光の複素振幅から再生面 ( $z=0$ ) への距離  $-z_0$  のフレネル変換を行い、再生を行う。最後に再生された強度と位相分布を測定試料の強度と位相分布を比較する。

ホログラムの実験においては、Fig. 2 の薄い矢印の過程は光学的に、また、濃い矢印の過程を数値計算で行う。Fig. 2 から明らかなように、デジタルホログラフィにおいては量子化の過程が計測プロセスの途中に入り、フレネル変換を通して測定結果に影響する。

シミュレーションの条件を下に示す。Fig. 2 のフローチャートに従い、1 回目のフレネル変換はピクセル数： $N=1,024$ 、試料の面のピッチ： $p_x=p_y=7.4\mu\text{m}$ 、CCD のピッチ： $P_x=P_y=7.4\mu\text{m}$ 、波長： $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ 、距離： $z=88.613\text{mm}$ 、また、2 回目のフレネル変換はピクセル数： $N=1,024$ 、CCD のピッチ： $p_x=p_y=7.4\mu\text{m}$ 、再生面のピッチ： $P_x=P_y=7.4\mu\text{m}$ 、波長： $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ 、距離： $z=-88.613\text{mm}$  とし、検討を行った。これらのパラメー

タは実験に用いる値を参考とし、なおかつシミュレーションが容易になり、数値フレネル変換の誤差が少なくなるように選んだ。

### 4. 試料の強度による測定誤差の検討

#### 4.1 試料の強度が均一な場合

最初の検討は、全面積において強度が 1 と均一であり、位相が  $x$  方向に  $-\pi \leq \phi < \pi$  の範囲で直線的に増加する試料を用いシミュレーションによる検討を行った。この試料を Fig. 3 のように全定義域にわたって連続的な位相変化とすることにより、量子化の影響が偏在していないか確認できる。

Fig. 4 (A), (C), (E) は再生像の強度で、(B), (D), (F) は  $y=511$  pixel での再生像の強度分布である。量子化数が 6 ビットでは大きなノイズが生じているが、8 ビット、12 ビットと量子化数が増えるにしたがってノイズが減り、均一な強度分布となることが分かる。詳細に検討を行うため、再生像の強度から測定試料の強度を差し引いた強度の誤差を Fig. 4 に示す。Fig. 5 は Fig. 4 の表示法が同じで、再生像の位相と位相の誤差をグラフ化したものである。両者から量子化ビット数が大きくなるにつれて強度と位相の誤差が小さくなることが分かる。

Fig. 6 に  $y=511$  pixel における  $x=0$  pixel から 1,023 pixel までの強度の誤差の標準偏差および位相の誤差の標準偏差と量子化ビット数の関係を示す。試料の強度は均一で、位相は  $y$  方向に依存性はないと考えられるので、一例として  $y=511$  pixel での強度と位相の誤差を取り出し標準偏差を求めた。グラフより量子化ビット数が多くなるにつれて強度と位相の誤差の標準偏差がともに小さくなることを確かめた。よって、量子化数が大きくなるほど強度と位相の測定誤差が小さくなり、精度よく測定できることを確認した。また、グラフより求める強度と

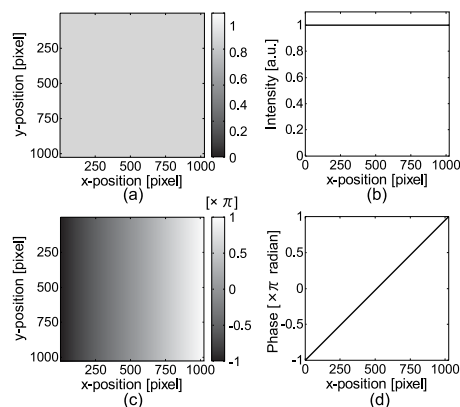


Fig. 3 Input image (uniform intensity).

Overall views of (a) intensity and (c) phase.  
Cross-sectional profiles of (b) intensity and (d) phase at  $y=511$ .

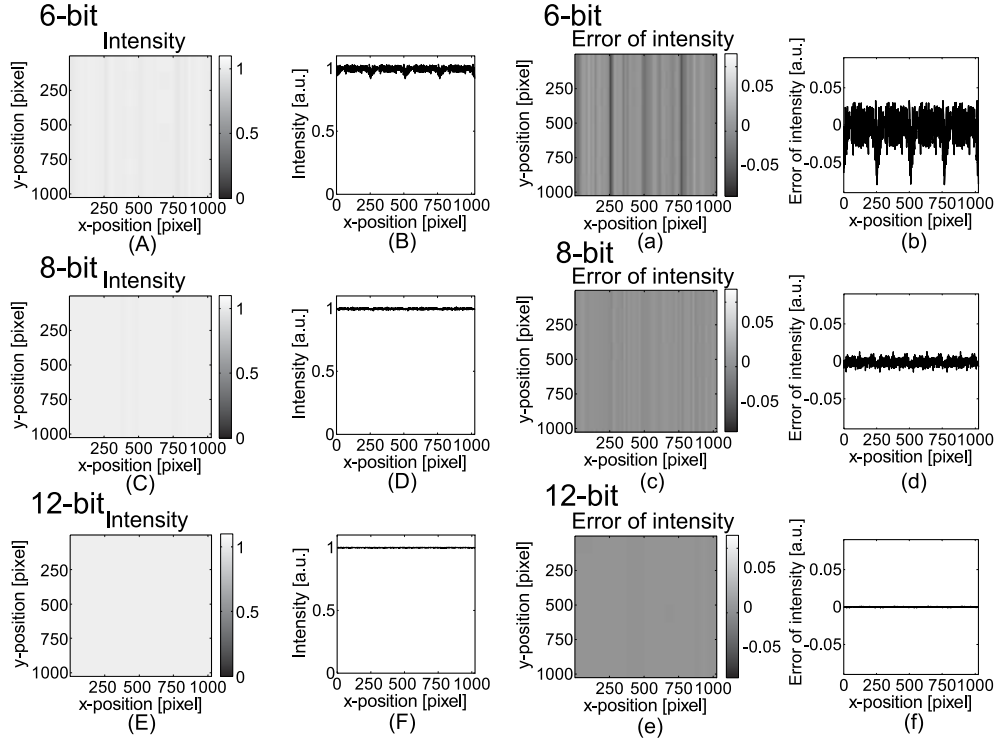


Fig. 4 Intensity of reconstructed image.

Output data.

Overall views of (A) 6-bit, (C) 8-bit and (E) 12-bit.  
Cross-sectional profiles of (B) 6-bit, (D) 8-bit and (F) 12-bit at  $y=511$ .

Error.

Overall views of (a) 6-bit, (c) 8-bit and (e) 12-bit.  
Cross-sectional profiles of (b) 6-bit, (d) 8-bit and (f) 12-bit at  $y=511$ .

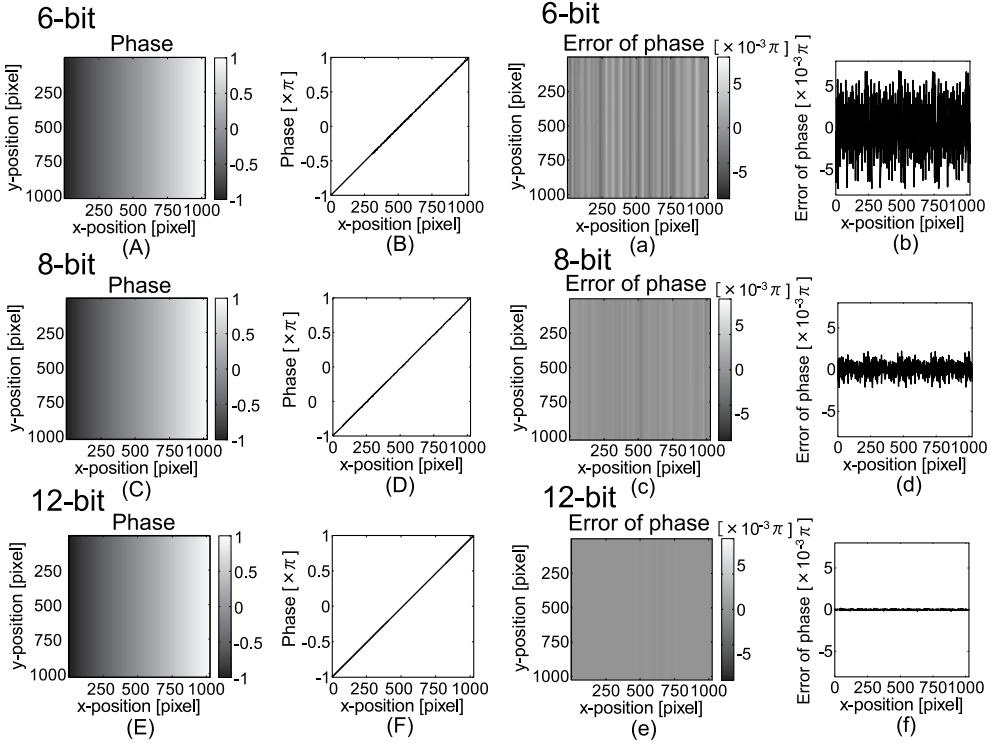


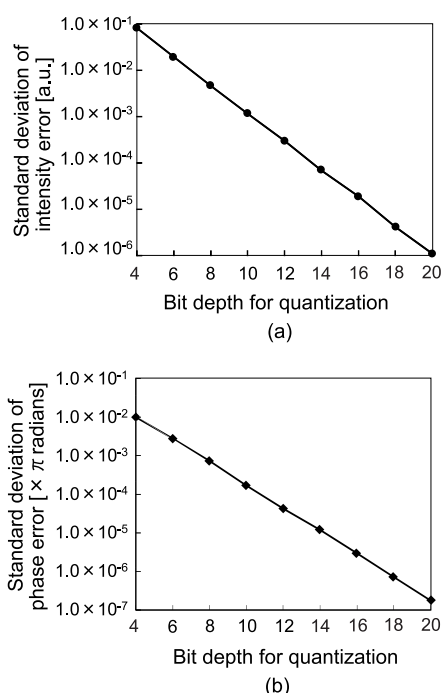
Fig. 5 Phase of reconstructed image.

Output data.

Overall views of (A) 6-bit, (C) 8-bit and (E) 12-bit.  
Cross-sectional profiles of (B) 6-bit, (D) 8-bit and (F) 12-bit at  $y=511$ .

Error.

Overall views of (a) 6-bit, (c) 8-bit and (e) 12-bit.  
Cross-sectional profiles of (b) 6-bit, (d) 8-bit and (f) 12-bit at  $y=511$ .

Fig. 6 Standard deviation of error ( $y=511$ ) and bit depth for quantization.

(a) Intensity error. (b) Phase error.

位相の標準偏差を得るために必要な CCD の量子化数を推定することができる。

#### 4.2 試料の強度が階段状に変化する場合

前節では試料面上の強度を均一としたが、本節では試料の強度分布が変化する場合、再生像の強度と位相に生

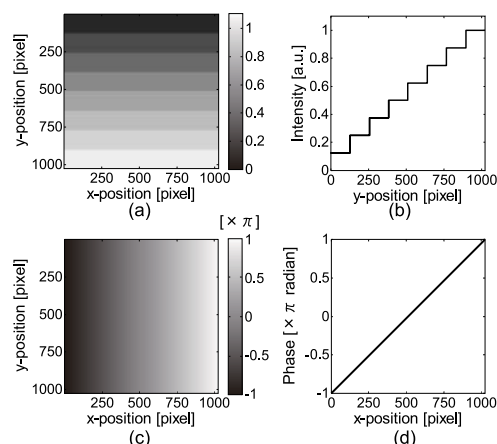


Fig. 7 Input data (8-level intensity).

Overall views of (a) intensity and (c) phase.

Cross-sectional profiles of (b) intensity and (d) phase at  $y=511$ .

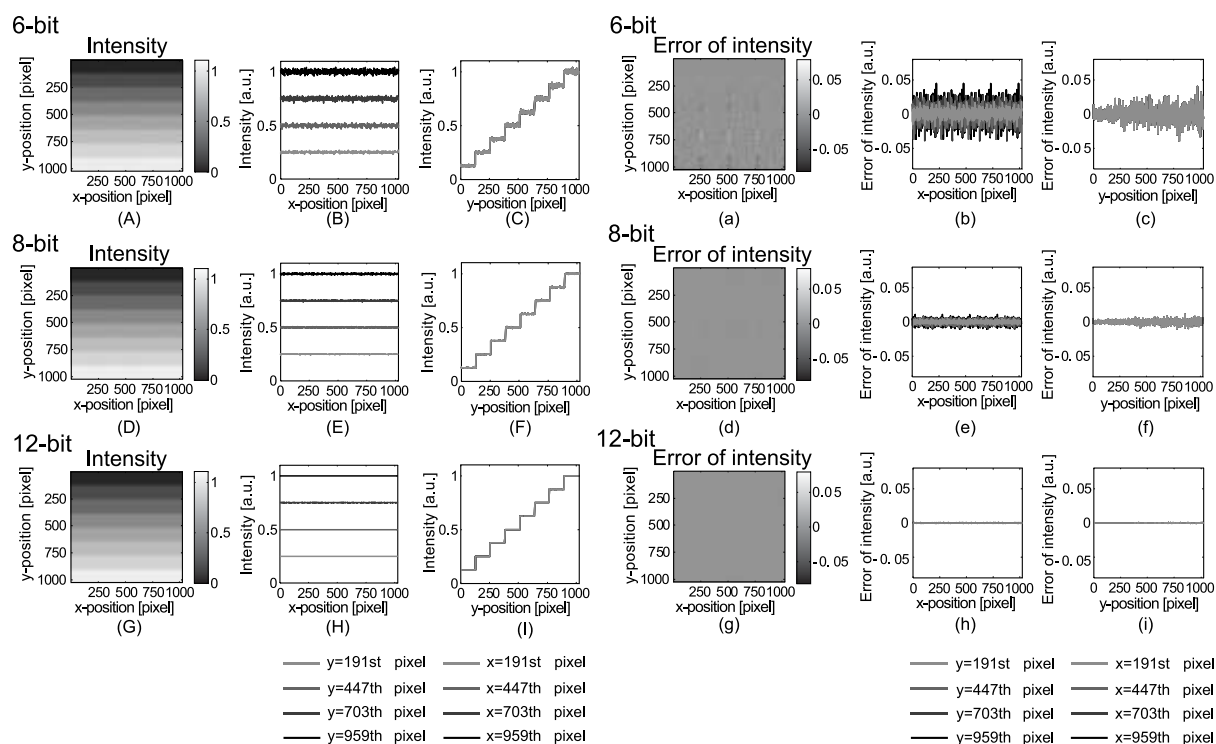


Fig. 8 Intensity of reconstructed image.

Output data.

Overall views of (A) 6-bit, (D) 8-bit and (G) 12-bit.  
Horizontal cross-sectional profiles of (B) 6-bit, (E) 8-bit and (H) 12-bit at  $y=191$ , 447, 703 and 959.  
Vertical cross-sectional profiles of (C) 6-bit, (F) 8-bit and (I) 12-bit at  $x=191$ , 447, 703 and 959.

Error.

Overall views of (a) 6-bit, (d) 8-bit and (g) 12-bit.  
Horizontal cross-sectional profiles of (b) 6-bit, (e) 8-bit and (h) 12-bit at  $y=191$ , 447, 703 and 959.  
Vertical cross-sectional profiles of (c) 6-bit, (f) 8-bit and (i) 12-bit at  $x=191$ , 447, 703 and 959.



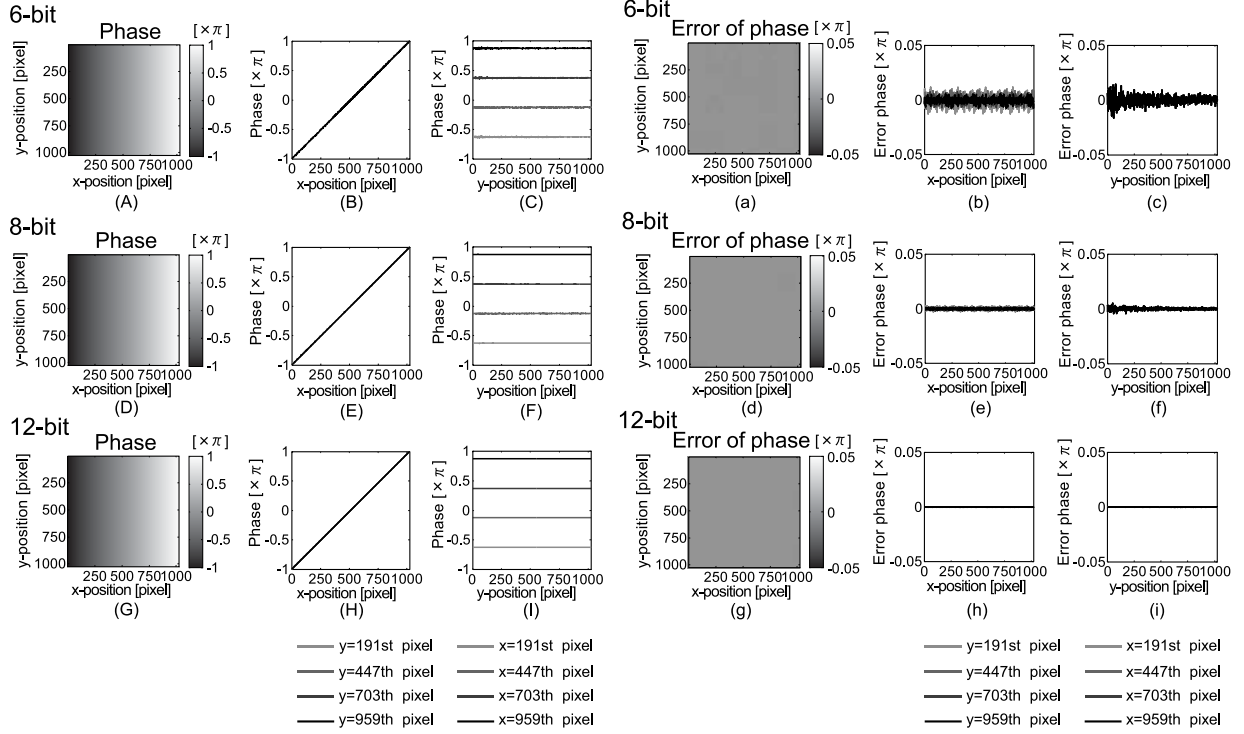


Fig. 9 Phase of reconstructed image.

Output data.

Overall views of (A) 6-bit, (D) 8-bit and (G) 12-bit.  
Horizontal cross-sectional profiles of (B) 6-bit, (E) 8-bit and (H) 12-bit at  $y=191, 447, 703$  and  $959$ .  
Vertical cross-sectional profiles of (C) 6-bit, (F) 8-bit and (I) 12-bit at  $x=191, 447, 703$  and  $959$ .

Error.

Overall views of (a) 6-bit, (d) 8-bit and (g) 12-bit.  
Horizontal cross-sectional profiles of (b) 6-bit, (e) 8-bit and (h) 12-bit at  $y=191, 447, 703$  and  $959$ .  
Vertical cross-sectional profiles of (c) 6-bit, (f) 8-bit and (i) 12-bit at  $x=191, 447, 703$  and  $959$ .

じる影響について検討を加えた。強度が階段状（8段階）に変化し、位相が  $x$  方向に  $-\pi \leq \phi < \pi$  の範囲で直線的に増えるものを試料とした。Fig. 7 には試料の強度と位相を示す。 $y$  方向のピクセル番号が大きくなると、試料の強度値が最小  $1/8=0.125$  から最大  $1$  まで 8 段階に変化する。

Fig. 8 (A) から (I) に再生像の強度分布を示す。(A), (D), (G) は全体の分布である。(B), (E), (H) は試料の強度が均一な  $x$  方向の強度分布である。(C), (F), (I) は位相が均一な  $y$  方向の強度分布を示している。いずれもグラフの線の色が濃いほど、191, 447, 703, 959 pixel と位置  $y$  および  $x$  のピクセル番号が多くなる。ただし、4 本のグラフはほとんど重なっており、 $x=191$  pixel のみが確認できる。より詳細な検討を行うため、再生像の強度から試料の強度を差し引いた強度の誤差を Fig. 8 (a) から (i) に示す。(b), (e), (h) より、 $y$  の値が大きいほど、つまり、試料の強度が大きいほど誤差が大きいことが分かる。

Fig. 9 (A) から (I) に再生像の位相分布、(a) から (i) に位相の誤差を示した。グラフの表示法は Fig. 8 の強度と同じである。(c), (f), (i) はそれぞれのグラフ

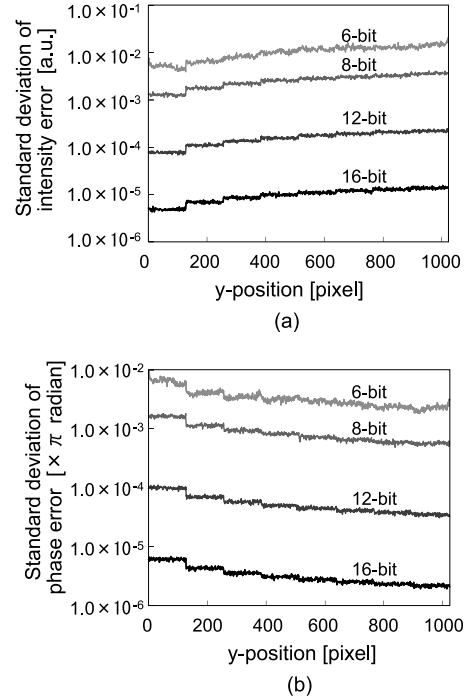


Fig. 10 Standard deviation of errors.

(a) Intensity error. (b) Phase error.

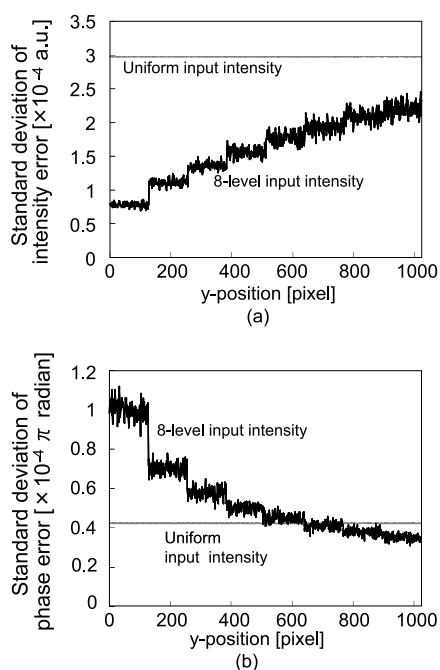


Fig. 11 Standard deviation of error at different (vertical) position of 12-bit.

(a) Intensity error. (b) Phase error.

の線が重なっており、 $x=959$  pixel のみが確認できる。試料の強度が大きいほど誤差が小さくなることから分かる。

Fig. 10 は  $x=0$  pixel から 1,023 pixel までのそれぞれの  $y$  の位置での強度の誤差の標準偏差と位相の標準偏差の関係を表している片対数グラフである。試料の強度が均一な場合と同じように、強度と位相の誤差の標準偏差は量子化数が多くなるにつれて小さくなるため、量子化数が大きいほど強度と位相の測定誤差が小さくなることを確認した。また、強度が大きくなると強度誤差は増加し、位相誤差は減少する傾向も見えてとれる。

Fig. 11 は、Fig. 10 の量子化数 12 ビットの強度と位相の誤差の標準偏差を取り出したグラフである。黒い線は試料の強度が階段状に変化するもので、縦軸は線型の日盛りである。 $y$  の位置が大きくなるほど、つまり、試料の強度が大きいほど、強度の誤差の標準偏差は大きくなり、逆に、位相の誤差の標準偏差は小さくなることから分かる。そこで、試料の強度の大きさによる強度と位相の誤差の標準偏差の変化について検討した。

CCD により量子化される前の振幅を  $A$ 、量子化によって生じる振幅の誤差を  $\Delta A$  とすると、CCD により取得される強度は

$$(A + \Delta A)^2 = A^2 + 2A\Delta A + \Delta A^2 \quad (4)$$

で表される。 $2A\Delta A$  は  $A$  が大きいほど大きくなるので、CCD 面上での強度が大きいほど強度の誤差が大きくな

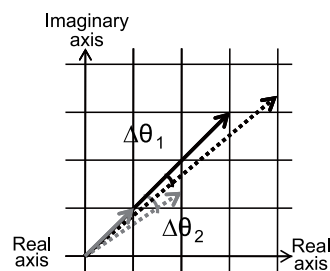


Fig. 12 Comparison of large amplitude and small amplitude.

り、試料の強度が大きいほど強度の誤差が大きくなると言える。

次に位相に関して検討を行った。強度分布  $I$  は CCD により取得されるため量子化される。つまり、それぞれの位相シフト量  $\phi$  の CCD 面上での強度分布  $I(x, y, 0)$ ,  $I(x, y, \pi/2)$ ,  $I(x, y, \pi)$ ,  $I(x, y, 3\pi/2)$  は量子化されるため、式 (2) より CCD の量子化の影響を受けた直接像  $I_{int}$  の実部と虚部が量子化されることが分かる。参照光  $U_{ref}$  が平行光の場合定数なので、算出される CCD 面上の物体光の複素振幅  $U_{obj}$  は同じく実部と虚部が離散的な値を取り、複素平面で離散的な矢印へ丸められる。例えば、振幅の大きい  $U_{obj}$  (黒) と振幅の小さい  $U_{obj}$  (グレー) を点線の矢印で表すと (Fig. 12), それぞれ点線の矢印は実線の矢印と丸められる。振幅の大きい物体光の複素振幅に生じる位相の誤差  $\Delta\theta_1$  と、振幅の小さい  $U_{obj}$  に生じる位相の誤差  $\Delta\theta_2$  の関係は  $\Delta\theta_1 < \Delta\theta_2$  となる。よって、CCD 面上での振幅が大きいほど、つまり、試料の強度が大きいほど、位相の誤差の標準偏差が小さくなることが予測される。

したがって、試料の強度に変化がある場合、試料の強度が大きいと、強度が低い領域と比べ再生像の強度の誤差は増えるが、位相の測定精度が向上すると考えられる。

#### 4.3 試料の強度が均一な場合と階段状に変化する場合の比較

Fig. 11 (a) から分かるように、量子化数によらず (Fig. 11 では 1 つの例を示す)、試料の強度が変化する場合 (黒) は、試料の強度が大きいほど強度の誤差の標準偏差が小さくなるため、試料の強度が均一の場合 (グレー) に比べ全ての位置で強度の誤差が小さくなる。しかし、試料の強度が階段状の場合、均一の場合の強度と同じ強度 1 の領域でも均一な場合と比較し、標準偏差が小さくなっていることが確認できる。

一方、位相の誤差の標準偏差は試料の強度が大きいほど小さくなる。そのため、試料の強度が階段状に変化するときの位相の誤差の標準偏差が試料の強度が一定のものより大きくなることが予想される。しかし、興味深い

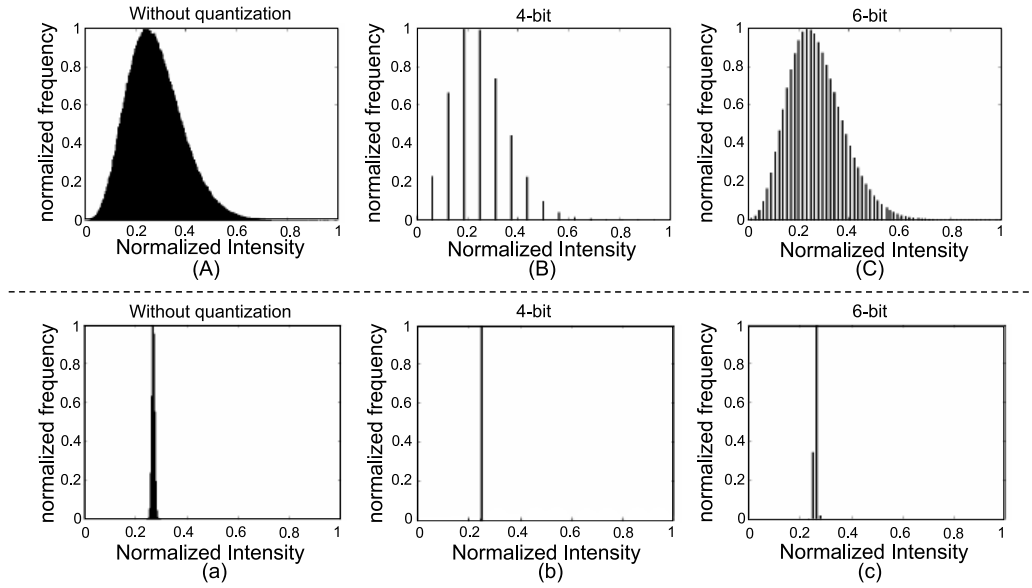


Fig. 13 Examples of histogram of hologram.

Broad distribution of (A) without, (B) 4-bit and (C) 6-bit quantization.  
Narrow distribution of (a) without, (b) 4-bit and (c) 6-bit quantization.

ことに、Fig. 11 (b) より誤差の標準偏差階段状に変化する試料の位相の誤差の標準偏差は、 $y$  の位置が大きくなり試料の強度が大きくなると、試料の強度が均一のものよりも小さくなる領域があることが分かる。この様にして再生像の画質は単純に量子化ビット数だけで決まるのではなく、画像に依存する。

この原因を考慮する上で、ホログラムの強度のヒストグラムが有効である。Fig. 13 はヒストグラムの例で、横軸が強度で、縦軸が各区間に存在するデータ数を最大値で規格化したものである。Fig. 13 (A) のように量子化の無いときのヒストグラムが広い範囲に分布すると、Fig. 13 (B) と (C) のように量子化数を大きくしていくと情報量が増える。そのため、画像が向上すると予想される。一方で、Fig. 13 (a) のように量子化の無いときのヒストグラムが狭い範囲に限られると、Fig. 13 (b) と (c) のように量子化数を大きくしても情報量が増えず、画質があまり向上しない。つまり、量子化ビット数の影響は元画像に依存することが分かる。

Fig. 14 (a) に試料の強度が均一な場合の CCD 面でのホログラムのヒストグラムを示す。ヒストグラムの分布が両端の狭い範囲に集中していることが確認できる。一方、試料の強度が階段状に変化する場合の Fig. 14 (b) はより広い範囲に分布していることが分かる。試料の強度が階段状の場合は試料の強度が均一のものよりもホログラムのヒストグラムが広い範囲にわたるため、量子化ビット数を多くすることで情報量が増加し、Fig. 11 で試料の強度が同じ領域でも強度と位相の誤差の標準偏差が

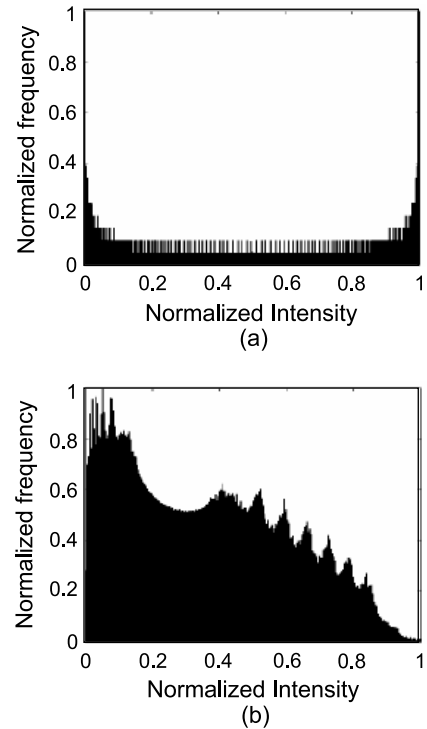


Fig. 14 Actual histograms of hologram ( $\phi=0$ , without quantization).

(a) Uniform input intensity. (b) 8-level input intensity.

小さくなると考えられる。つまり、ホログラムのヒストグラムの分布が広い場合、狭い場合と比較して、量子化ビット数を増やすと測定精度が上がるのが予測される。



## 5. ま と め

シミュレーションにより、位相シフトデジタルホログラフィの量子化の影響について再生される強度と位相について検討を行い、次の結果を得た。

- (1) 強度が均一で位相が変化する試料と強度と位相が変化する試料ではいずれも、量子化数が大きくなるほど強度と位相のいずれの測定誤差が小さくなり、精度良く測定できることを確認した。
- (2) 強度が均一で、位相が $-\pi \leq \phi < \pi$ の範囲で比例して増える変化する試料について検討を行い、グラフより所望の強度と位相の標準偏差を得るために必要なCCDの量子化数を推定することができた。
- (3) 試料の強度が変化する場合、再生面において試料の強度が大きい方が、強度の測定精度は落ちるが、位相の測定精度は向上することが分かった。
- (4) ホログラムのヒストグラムの分布が広い範囲にわたる場合、量子化ビット数を増やすと、分布が狭い場合

と比較して、再生像の画質が向上することが予測される。

これらのことから明らかなように、デジタルホログラフィの場合は測定の最後ではなく途中に量子化の過程が入るため、高精度化のためにはシミュレーションや実験を通してこれらを明らかにしていく必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) E. Watanabe, C. Fujikawa, J. Mizuno and K. Kodate: Proc. SPIE **6488** 64880A (2007).
- 2) 渡邊恵理子, 羽坂円彩, 水野 潤, 小舘香椎子: 光設計研究グループ機関紙 **39** 41-46 (2008).
- 3) M. Hanesaka, E. Watanabe, J. Mizuno and K. Kodate: MOC '08 213-214 (2008).
- 4) U. Schnars and W. Juptner: Appl. Opt. **33** 179-181 (1994).
- 5) I. Yamaguchi and T. Zhang: Opt. Lett. **22** 1268-1270 (1997).
- 6) G. A. Mills and I. Yamaguchi: Appl. Opt. **44** 1216-1225 (2005).

# Measurement Error Due to Quantization by Image Sensor in Phase-shifting Digital Holography

Tomoko Nakayama<sup>1</sup>, Jun Mizuno<sup>1</sup>, Eriko Watanabe<sup>1, 2</sup> and Kashiko Kodate<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematical and Physical Science, Faculty of Science, Japan Women's University

<sup>2</sup>Japan Science and Technology Agency PRESTO

(Received November 12, 2008)

**Abstract:** We proposed the phase measurement system using digital holography to observe quantitatively phase objects such as optical devices and living cells. In digital holography, interferogram is recorded by an image sensor with finite gradation, and it is numerically reconstructed by a computer. In order to measure imperceptible phase change, we investigate the intensity and phase errors due to quantization of the interferogram by simulation. One of the measurement samples has uniform intensity and varying phase, and the other has varying intensity and phase. The intensity and phase errors of reconstructed image become smaller as the quantization bit number increases. In case of the sample with varying intensity, we find that the errors of intensity and phase become larger and smaller, respectively, as the intensity of the sample increases. We also investigate the reason why the effect of quantization bit number depends on the original image by comparing the hologram histograms.

**Key Word:** Phase-shifting digital holography, image sensor, CCD, quantization, measurement error