

デジタルホログラフィーの高画質化を目指した ホログラム合成技術

野村 孝徳

Digital Hologram Synthesis for Improvement of Reconstructed Image Quality

Takanori NOMURA

A reconstructed image in the digital holography is suffering from speckles. Comparing a conventional film hologram, the extent of a digital hologram is small and the resolution of the hologram is low in single figure. To improve the image quality, two methods are presented. One is the method based on the superposition of the reconstructed images with different wavelengths. Another is the method based on the multiple holograms.

Key words: digital holography, hologram synthesis

デジタルホログラフィーの研究分野には、位相シフトデジタルホログラフィー¹⁾の論文を発端に多くの研究者が参入し、数多くの研究が報告されていることは周知の事実である。位相シフト法を瞬時に実現するシングルショット位相シフト法の研究²⁻⁸⁾をはじめ、画像の暗号化^{9,10)}や三次元物体認識^{11,12)}、顕微鏡^{13,14)}などさまざまな分野への応用研究が報告されている。しかしながら、デジタルホログラフィーの再生像にはスペックルが顕著であり、画質が低いことは否めない。これは古典的なフィルムホログラムに比べて、デジタルホログラムの大きさ、すなわち撮像素子の面積が非常に小さいことが要因である。スペックルの影響を低減するために、ウェーブレット変換をはじめ、いくつかの信号処理を用いた手法が提案されている¹⁵⁻¹⁸⁾。

本稿では、スペックルを低減しデジタルホログラムの画質を向上する方法を2つ紹介する。1つは異なった波長によって記録された再生像の重ね合わせによる手法であり、もう1つは多重デジタルホログラムによる手法である。スペックルの特徴を簡潔に述べた後、それぞれの方法を実験結果とともに紹介する。

1. デジタルホログラフィー再生像のスペックル

無限の大きさをもつデジタルホログラムを $u(X, Y)$ とすると、 $a \times b$ の大きさの撮像素子で記録されたデジタルホログラム $u'(X, Y)$ は

$$u'(X, Y) = u(X, Y) \operatorname{rect}\left(\frac{X}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{Y}{b}\right) \quad (1)$$

と書ける。シングルFFT法を用いてデジタルホログラムを再生すると、再生像の複素振幅分布 $U(x, y)$ は

$$\text{式(2)次頁へ} \quad (2)$$

となる。ここで、 \mathcal{F} および $*$ 、 d はそれぞれ、フーリエ変換演算子、畳み込み積分演算子、再生距離を表す。式(2)からわかるように、再生像は無限の大きさのデジタルホログラムの再生像と撮像素子の大きさで決まる sinc 関数との畳み込み積分で得られる。スペックルの大きさを sinc 関数の原点付近のピークの半値全幅とすると、スペックルの大きさ ΔS_X と ΔS_Y は

$$\Delta S_X = \frac{\lambda d}{a} \quad (3)$$

$$\Delta S_Y = \frac{\lambda d}{b} \quad (4)$$

と見積もることができる¹⁹⁾。これらの大きさを小さくす

$$\begin{aligned}
U'(x, y) &= \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2+y^2}{2d}\right) \mathcal{F}\left[u'(X, Y) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{X^2+Y^2}{2d}\right)\right] \\
&= \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2+y^2}{2d}\right) \mathcal{F}\left[u(X, Y) \operatorname{rect}\left(\frac{X}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{Y}{b}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{X^2+Y^2}{2d}\right)\right] \\
&= \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2+y^2}{2d}\right) \mathcal{F}\left[u(X, Y) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{X^2+Y^2}{2d}\right)\right] * \mathcal{F}\left[\operatorname{rect}\left(\frac{X}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{Y}{b}\right)\right] \\
&= U(x, y) * \operatorname{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda d}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{ay}{\lambda d}\right)
\end{aligned} \tag{2}$$

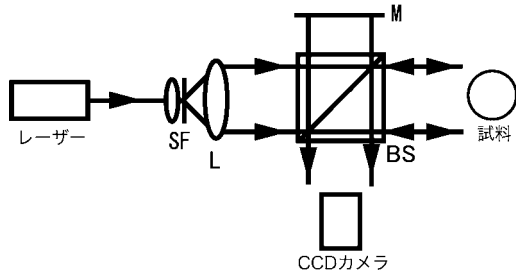


図1 多波長デジタルホログラムによる画質改善実験光学系. SF: スペシャルフィルター, L: レンズ, BS: ビームスプリッター, M: ミラー.

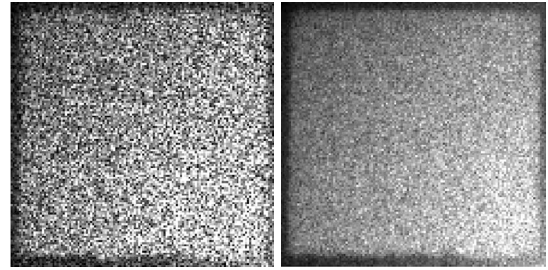


図2 白板の再生画像. (a) デジタルホログラム1枚によるもの, (b) 8枚の多波長デジタルホログラムによるもの.

ることが再生像の画質の改善に繋がる.

2. 多波長デジタルホログラムによる画質改善

2.1 多波長デジタルホログラム再生像のスペックル

本節では、異なった波長を用いて記録されたデジタルホログラムの再生像のスペックルの位置が異なることを利用した画質改善方法²⁰⁾を紹介する. 異なった波長を用いて記録されたデジタルホログラムの再生像は、スペックルの位置や形状のみが異なっているとす. すなわち、再生像の強度分布 $I_i(X, Y)$ は

$$I_i(X, Y) = I(X, Y) + S_{\lambda_i}(X, Y) \tag{5}$$

と書けるとす. ここで $I(X, Y)$ はスペックルのない再生像, $S_{\lambda_i}(X, Y)$ は波長 λ_i ($i=1, \dots, N$) で記録したときのスペックルである. 異なった波長で記録再生された再生像の和

$$\begin{aligned}
I'(X, Y) &= \sum_{i=1}^N I_i(X, Y) \\
&= \sum_{i=1}^N I(X, Y) + \sum_{i=1}^N S_{\lambda_i}(X, Y) \\
&= NI(X, Y) + \sum_{i=1}^N S_{\lambda_i}(X, Y)
\end{aligned} \tag{6}$$

となる. 和を求めることによってスペックルが平均化され

$$NI'(X, Y) \gg \sum_{i=1}^N S_{\lambda_i}(X, Y) \tag{7}$$

が成り立つとすると

$$I'(X, Y) = NI(X, Y) \tag{8}$$

となり、画質の向上が期待できる.

2.2 実験結果

多波長デジタルホログラムによる画質改善効果を実証するための実験結果を示す. 図1に示すマイケルソン干渉計から構成される軸外し配置の光学系を用いた. 試料には大きさが10 mm角の白いアクリル板を使用し、カメラとの距離は300 mmである. 光源には波長可変レーザーを使用し、8 nm 間隔で568 nm から624 nm の波長を用いて8枚のデジタルホログラムを記録した. 再生結果を図2に示す. 図2 (a) は単波長616 nm を使用した再生像であり、図2 (b) は8枚 (8波長) のデジタルホログラムを用いた再生像である. 多波長デジタルホログラムを用いたほうが、明らかにスペックルが抑制されていることがわかる. このことを定量的に示すために、デジタルホログラムの枚数 (記録波長の数) と再生像輝度の分散の関係を求めた結果を図3に示す. なお、分散値はデジタルホログラムの枚数が1の場合に100となるように規格化している. 枚数の増加に伴い輝度の分散が減少し、本手法が有用であることがわかる. 輝度の分散がデジタルホログラムの枚数にほぼ反比例していることから、スペックルは異なった波長によって記録されたデジタルホログラムの再

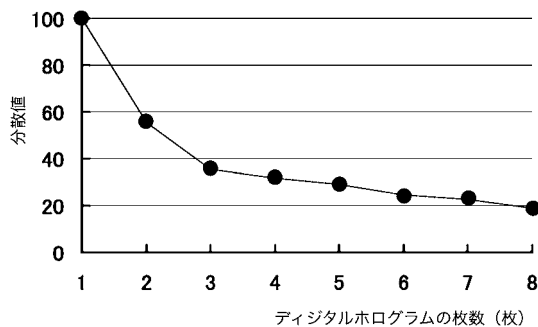


図3 多波長デジタルホログラムの枚数と輝度分散の関係。

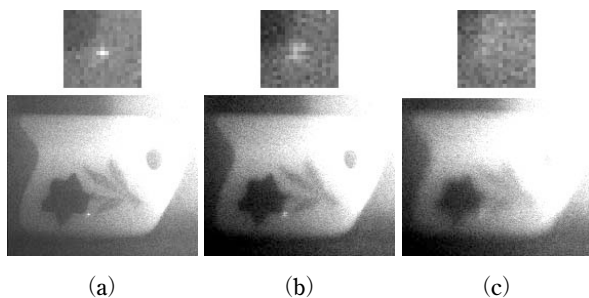


図4 多波長デジタルホログラムによる再生像。(a) 再生距離 520 mm (合焦位置), (b) 再生距離 420 mm, (c) 再生距離 320 mm。

生像に一樣にランダムに現れるという前節の仮定が裏付けられた。

次に一般的な反射物体を用いて行った実験結果について述べる。先ほどと同じ光学系を用いた。試料には大きさが 20 mm 程度のミニチュアの水差しを使用し、カメラとの距離は 520 mm である。ミニチュアの水差しには白地に花(花びらは薄紅色、茎と葉は緑色)の絵が描かれている。およそ 1 nm 間隔の 567~606 nm までの波長を用いて、38 枚のデジタルホログラムを記録した。物体の色による反射率は照明波長によって異なるため、得られる多波長デジタルホログラムによる再生像は各波長ごとの反射率の平均値が得られることになる。

図4と図5に多波長デジタルホログラムと単波長デジタルホログラム(照明波長は 567 nm)によるデジタルフォーカシング再生像を示す。各再生像の右上が明るくなっているのは0次光の影響である。また、各再生像の花びらの右下の輝点(図4(a)で顕著)付近を拡大したものをそれぞれの上部に示している。単波長デジタルホログラムの再生像のミニチュアの水差しの茎と葉が白地の部分と区別がつかないが、これは、茎と葉の色が緑色で、照明波長(567 nm)による反射率が高いためである。これらの再生像から、多重デジタルホログラムによるスペックル

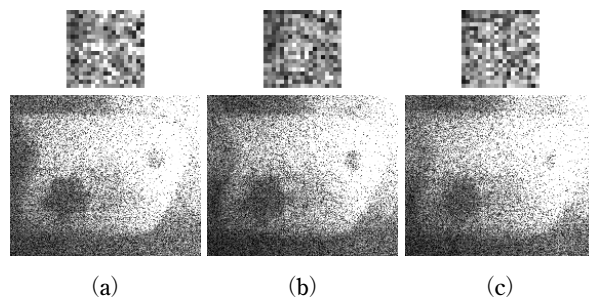


図5 単波長デジタルホログラムによる再生像。(a) 再生距離 520 mm (合焦位置), (b) 再生距離 420 mm, (c) 再生距離 320 mm。

抑制効果を示されていることがわかる。なお、式(2)で示す再生アルゴリズムを用いているが、再生像のサンプリング間隔が波長に依存するため、デジタルホログラムデータの内挿によって波長依存性を取り除いている²⁰⁾。

本手法は式(6)からわかるように、強度分布の和によってスペックルを抑制するものであり、デジタルホログラムの再生像として複素振幅が必要な場合には適用できないことに注意が必要である。

3. 多重デジタルホログラムによる画質改善

本節では、式(3)、(4)で示されるスペックルの大きさを小さくして、デジタルホログラム再生像の画質を向上させる方法を紹介する。デジタルホログラムを大きくして画質を向上させる方法にはいくつかの報告^{21,22)}がある。撮像素子の大きさだけシフトさせながら多数のデジタルホログラムを記録し、それらを接続して大きなデジタルホログラムを得る手法である。ホログラムの大きさが m 倍になればスペックルの大きさは $1/m$ 倍となるため、合成する毎数が多いほど効果的である。しかし、カメラを光軸に垂直な面内で m 回移動させて撮影する必要がある、あまり現実的な手法とはいえない。

そこで、全方向から記録したデジタルホログラムを用いて等価的に大面積の単一平面デジタルホログラムを製作し、画質を改善する手法を紹介する。

3.1 デジタルホログラムの記録と合成

物体もしくは撮像素子を回転させてデジタルホログラムを記録することを考える。記録されたあるデジタルホログラムを H_n (以下、中心デジタルホログラムとよぶ) とすると、その前後の回転角で記録されたデジタルホログラム H_{n-1} と H_{n+1} (以下、近傍デジタルホログラムとよぶ) は、図6のように同一平面内には存在しない。そのため、相関演算を用いて合成する手法^{21,22)} は直接的には適用できない。デジタルホログラムを合成するために

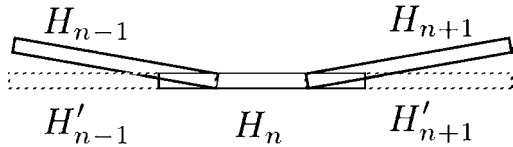


図6 デジタルホログラムとその近傍デジタルホログラム。

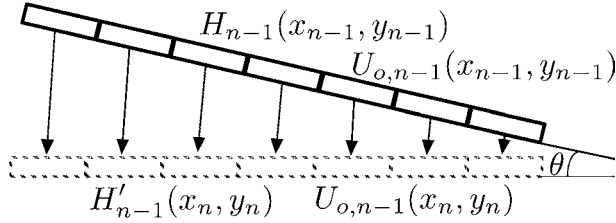


図7 物体光波面の数値伝搬。

は、図6の破線で示したように新たなデジタルホログラム H_{n-1} と H_{n+1} を準備する必要がある。

ここでは近傍デジタルホログラムを数値伝搬により中心デジタルホログラムと同一平面に配置することを考える。近傍デジタルホログラムのひとつ、 $H_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ は

$$\begin{aligned} H_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1}) &= |U_r(x_{n-1}, y_{n-1}) + U_o(x_{n-1}, y_{n-1})|^2 \\ &= |U_r(x_{n-1}, y_{n-1})|^2 + U_o(x_{n-1}, y_{n-1})^2 \\ &\quad + U_o(x_{n-1}, y_{n-1}) U_r^*(x_{n-1}, y_{n-1}) \\ &\quad + U_o^*(x_{n-1}, y_{n-1}) U_r(x_{n-1}, y_{n-1}) \quad (9) \end{aligned}$$

で与えられるとする。ここで、 (x_{n-1}, y_{n-1}) は近傍デジタルホログラム $H_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ が存在する座標であり、 $U_o(x_{n-1}, y_{n-1})$ と $U_r(x_{n-1}, y_{n-1})$ はそれぞれ物体光と参照光の複素振幅分布である。軸外し配置であるとき、空間周波数フィルタリングにより $U_o(x_{n-1}, y_{n-1}) U_r^*(x_{n-1}, y_{n-1})$ を抽出することができる。このとき、参照光の複素振幅分布 $U_r(x_{n-1}, y_{n-1})$ が既知であるとする、物体光の複素振幅分布 $U_o(x_{n-1}, y_{n-1})$ を得ることができる。続いて、得られた物体光の複素振幅分布 $U_o(x_{n-1}, y_{n-1})$ の中心デジタルホログラムと同一平面への数値伝搬により $U_{o,n-1}(x_n, y_n)$ を求め、デジタルホログラム $H_{n-1}(x_n, y_n)$ を求める。数値伝搬は、伝搬距離が非常に短いため、図7に示すように光波は直進し、位相のみが伝搬距離に応じて変化するものとしている。このようにして得られたデジタルホログラムを相関演算を用いて合成することにより、大面積の単一平面デジタルホログラムを作製することができる。

3.2 実験結果

実験光学系は図1と同様のものを使用した。ただし、光源はHe-Neレーザー(波長633nm)で、試料は回転ステージの上に置かれ、カメラとの距離は400mmである。撮像

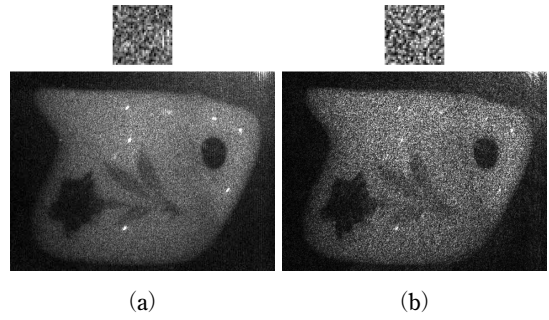


図8 多重デジタルホログラム合成による画質改善効果。(a) 11枚のデジタルホログラムを合成した大面積デジタルホログラムによるもの、(b) 単一のホログラムによるもの。

素子の画素数は 1024×768 画素、画素の大きさは $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ である。図6に示すように、中心デジタルホログラムと近傍デジタルホログラムが重なりをもつためには、0.4度以下の回転角度間隔にする必要がある。本実験では0.2度間隔で全周、すなわち1801枚のデジタルホログラムを記録した。

11枚のデジタルホログラムを合成し大面積デジタルホログラムを作製した。合成後の大面積デジタルホログラムの画素数は水平方向に約4倍の大きさをもっている。得られた大面積デジタルホログラムによる再生像を図8(a)に、単一のデジタルホログラムによる再生像を図8(b)に示す。両者のスペックルを比べるために再生像の一部を拡大した図をそれぞれの上部に示す。先に述べたように、合成後の大面積デジタルホログラムの画素数は水平方向に約4倍の大きさをもっているため、図8(a)のスペックルが、図8(b)のスペックルに比べて横方向の幅が小さく(式(3),(4)から約4分の1の大きさ)なっている。

これらの図から、デジタルホログラムを合成によるスペックル抑制効果が示され、数値伝搬合成によるアーティファクトも見受けられないこともわかる。一般に、デジタルホログラムからの再生像の被写界深度はデジタルホログラムが小さいことから非常に深い、本手法による合成後はデジタルホログラムの面積が大きくなり、被写界深度が浅くなることを期待される。

最後に、全周デジタルホログラムから45度ごとに抜き出し、再生した結果を図9を示す。図8と同様に、デジタルホログラムの合成によるスペックル抑制効果が示されている。

デジタルホログラフィーの再生像の画質を改善する手法を2つ紹介した。いずれも、得られたデジタルホログラムの計算処理によって画質を改善する手法である。こ

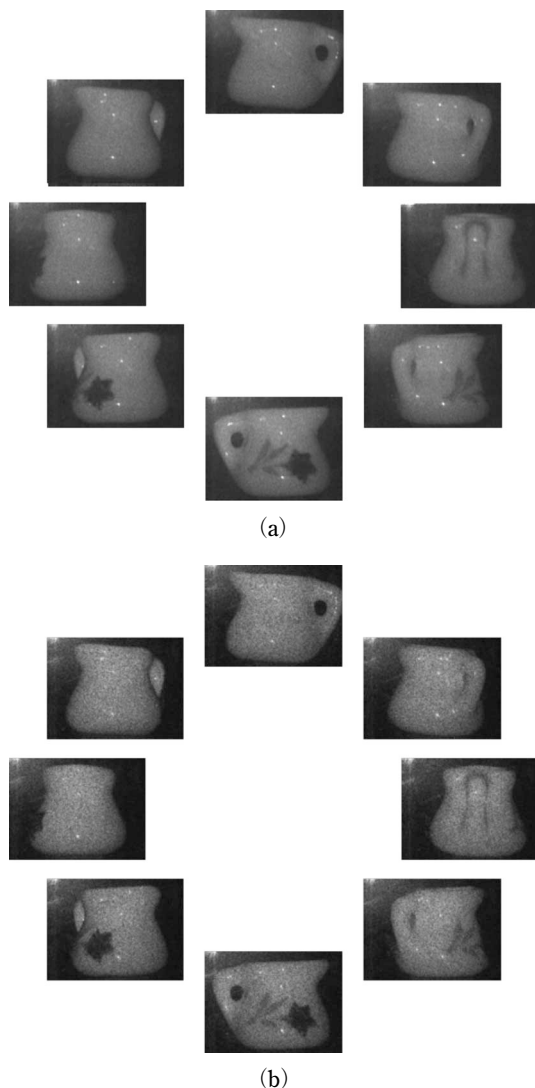


図9 全周囲デジタルホログラム再生像の比較。(a) 11枚のデジタルホログラムを合成した大面積デジタルホログラムによるもの、(b) 単一のホログラムによるもの。

に紹介した手法は一例であり、GPUをはじめとした近年の計算機の処理能力の向上によって、これまでは困難であった計算が可能となりつつある。今後、それらを活用した新たな画質向上手法が提案されることを期待したい。

文 献

- 1) I. Yamaguchi and T. Zhang: "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 2) Y. Awatsuji, M. Sasada and T. Kubota: "Parallel quasi-phase shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 1069-1071.
- 3) Y. Awatsuji, A. Fujii, T. Kubota and O. Matoba: "Parallel three-step phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 2995-3002.
- 4) Y. Awatsuji, T. Koyama, T. Tahara, K. Ito, Y. Shimozato, A.

- Kaneko, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota and O. Matoba: "Parallel optical-path-length-shifting digital holography," *Appl. Opt.*, **48** (2009) H160-H167.
- 5) T. Nomura, S. Murata, E. Nitanaï and T. Numata: "Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 4873-4877.
- 6) L. Martínez-León, M. Araiza-E, B. Javidi, P. Andrés, V. Climent, J. Lancis and E. Tajahuerce: "Single-shot digital holography by use of the fractional Talbot effect," *Opt. Express*, **17** (2009) 12900-12909 (<http://www.opticsinfobase.org/oe/home.cfm>).
- 7) H. Suzuki, T. Nomura, E. Nitanaï and T. Numata: "Dynamic recording of a digital hologram with single exposure by a wave-splitting phase-shifting method," *Opt. Rev.*, **17** (2010) 176-180.
- 8) T. Nomura and M. Imbe: "Single-exposure phase-shifting digital holography using a random-phase reference wave," *Opt. Lett.*, **35** (2010) 2281-2283.
- 9) B. Javidi and T. Nomura: "Securing information by use of digital holography," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 28-30.
- 10) E. Tajahuerce and B. Javidi: "Encrypting three-dimensional information with digital holography," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 6595-6601.
- 11) E. Tajahuerce, O. Matoba and B. Javidi: "Shift-invariant three-dimensional object recognition by means of digital holography," *Appl. Opt.*, **40** (2001) 3877-3886.
- 12) T. Nomura and B. Javidi: "Object recognition by use of polarimetric phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2146-2148.
- 13) C. Mann, L. Yu, C.-M. Lo and M. Kim: "High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography," *Opt. Express*, **13** (2005) 8693-8698.
- 14) M. C. Potcoava and M. K. Kim: "fingerprint biometry applications of digital holography and low-coherence interferography," *Appl. Opt.*, **48** (2009) H9-H15.
- 15) B. Javidi, P. Ferraro, S.-H. Hong, S. De Nicola, A. finizio, D. Alfieri and G. Pierattini: "Three-dimensional image fusion by use of multiwavelength digital holography," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 144-146.
- 16) B. Javidi, C. M. Do, S.-H. Hong and T. Nomura: "Multi-spectral holographic three-dimensional image fusion using discrete wavelet transform" *J. Display Technol.*, **2** (2006) 411-417.
- 17) J. Maycock, C. P. Mc Elhinney, J. B. McDonald, T. Naughton and B. Javidi: "Independent component analysis applied to digital holograms of three-dimensional objects," *Proc. SPIE*, **5908** (2005) 590806.
- 18) T. Kreis and K. Schlüter: "Resolution enhancement by aperture synthesis in digital holography," *Opt. Eng.*, **46** (2007) 055803.
- 19) T. Kreis: *Handbook of Holographic Interferometry* (Wiley VCH, Weinheim, 2005) p. 35.
- 20) T. Nomura, M. Okamura, E. Nitanaï and T. Numata: "Image quality improvement of digital holography by superposition of reconstructed images obtained by multiple wavelengths," *Appl. Opt.*, **47** (2008) D38-D43.
- 21) R. Binet, J. Colineau and J.-C. Leheureau: "Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4775-4782.
- 22) T. Nakatsuji and K. Matsushima: "Free-viewpoint images captured using phase-shifting synthetic aperture digital holography," *Appl. Opt.*, **47** (2008) D136-D143.

(2011年7月28日受理)