

位相シフトレンズレスフーリエデジタル ホログラフィによる広視野3次元画像情報の取得 Acquisition of 3-D Image in Large Visual Field by Using Phase-Shift Lensless-Fourier Digital Holography

中辻達也 長岡努 松島恭治
Tatsuya Nakatsuji Tsutomu Nagaoka Kyoji Matsushima

関西大学工学部先端情報電気工学科
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University

ABSTRACT

Digital holography is an excellent technique for getting wavefronts of light as digital data. However, the technique has a problem in acquisition of fields from large objects, because resolution of image sensors is generally not sufficient to record non-paraxial fields. Therefore, the technology is employed only in the field such as the measurement of surface deformation or microphotography. In this report a technique based on lensless Fourier transform holography is proposed to get over the limitation in acquisition of 3-D image of large objects. Maximum spatial frequency of the fringe pattern on an image sensor is theoretically analyzed to obtain the aliasing-free area. Recording objects up to 5cm × 5cm in dimension, placed within the aliasing-free area, is presented and its numerical reconstruction is demonstrated.

Keywords: レンズレスフーリエ, デジタルホログラフィ, 位相シフト

1. はじめに

デジタルホログラフィとは、干渉縞を写真乾板ではなくCCDやCMOSのようなイメージセンサに記録し、得られた強度分布を計算機で数値処理し物体光波を算出するものである。近年、デジタルカメラの発達により、高解像度のイメージセンサが容易に入手できるようになり、また計算機の演算能力の向上により比較的簡単に撮影と数値再生ができるようになった。

デジタルホログラフィを用いれば、2次元の複素振幅分布の形で物体光波の波面分布を取得できる。従って、回折演算のパラメータを変更することにより、様々な視点や位置での物体像を得ることができる。しかしながら、現在得られるイメージセンサでは、その解像度が、写真タイプのホログラフィで使用する記録材料に比べ大幅に低いため、遠くにある小さな物体しか撮影できず、視野角を広げることが出来ない。

視野角が狭いと、ある程度のサイズの物体を記録する場合、離れた位置に置かなければならず、Fig.1に示したとおり、物体—センサ間の距離が離

中辻達也

nakatsuji@laser.ee.kansai-u.ac.jp

関西大学工学部先端情報電気工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35

TEL 06-6368-1121(内線 5722)

れると撮影したホログラムを数値再生する際の視域が狭くなる。その結果、実際には視点を変えるなどの操作はほとんどできなくなってしまう。そのため、デジタルホログラフィを3次元画像データ取得の目的で用いる場合には、視域を広げることが重要となる。

従来からよく用いられているフレネル型の光学系では、物体光と参照光の角度を0とするインライン構成を用いても、イメージセンサ上の空間周波数が高くなってしまいうため、広視野の記録ができない問題点がある。そのため、空間周波数が低くなるレンズレスフーリエ型[1]の光学系を用い、さらに物体とイメージセンサの間に開口を設けることで空間周波数を制限する手法も知られているが、その場合視域が極めて限定されてしまうことが問題となる。

そこで、本研究ではレンズレスフーリエ型のデジタルホログラフィでイメージセンサ上の空間周波数が低くなることに着目し[2]、物体の大きさや位置に対する干渉縞の最大空間周波数の関係を算出することで、開口を用いることなく大きな物体を撮影することを試みた。この手法で位相シフト法[3]を用いることにより非回折光と共役像を除去して広視野化が可能であり、計算処理で合焦位置や視点位置の移動が可能で3次元物体画像データが得られると考えた。

2. 視野と視域

Fig.1に視野と視域の定義を示す[5]. センサの大きさを D , 視野を w , 物体とセンサ間の距離 d , 視野角を θ , 視域角を Ω とする. 参照光がセンサに垂直に入射する平面波の場合(以下, これをフレネル型と呼ぶ)のセンサ上の最大空間周波数と, 参照光が光軸上の点光源の場合(以下, レンズレスフーリエ型)の最大空間周波数は, それぞれ次式のように求まる(付録参照).

$$f_{Fresnel} = \frac{(w/2 + D/2)}{\lambda \sqrt{d^2 + (w/2 + D/2)^2}} \quad (1)$$

$$f_{Lensless} = \frac{w/2}{\lambda \sqrt{d^2 + (w/4)^2}} \quad (2)$$

センサピッチを δ とすると, ナイキストの定理からこれらの最大空間周波数は, $2f \leq 1/\delta$ を満たさなければならない. 逆にこの条件を満たす領域で物体を撮影した場合には, 開口等により空間周波数を制限する処置を行わなくても撮影可能である. この領域は, Fig.2に示すとおり, イメージセンサ面に頂点を接する四角錐となり, この範囲の中の物体はエイリアシング誤差を発生することなく撮影可能となる. つまり, Fig.2に示した距離 d_1 , d_2 , d_3 のいずれの距離であっても, 物体全体が撮影可能領域内にある場合にはその物体は撮影可能であり, その領域内に収まらない大きな物体を撮影した場合にのみエイリアシング誤差が生じる. 4096×4096 [pixel], ピッチ 6.0 [μm]のイメージセンサで, 物体-センサ間の距離 $d=60$ [cm]を仮定した場合の, イメージセンササイズ D に対する視野と視域角の関係をFig.3に示す. フレネル型では D が大きくなるにつれて, 視野(物体サイズ) w が小さくなるのに対してレンズレスフーリエ型では w は一定である. 一方, 視域角 Ω は当然ながらセンササイズに比例して増加していく. この結果より, フレネル型では近年容易に入手できる大型のイメージセンサが使用できない, つまり, 限定された視域角でしか撮影できないことがわかる. 一方, レンズレスフーリエ型では D を大きくしても視野を減少させる事なく視域を増加できることがわかる.

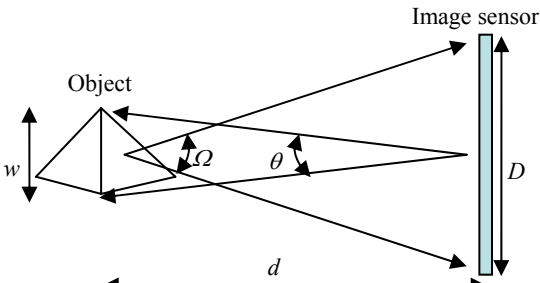


Fig.1 Definition of visual field and viewing zone.

3. 位相シフトレンズレスフーリエデジタルホログラフィの記録

Fig.4に記録光学系を示す. ここで, d_o は物体とセンサの距離, d_R は参照光点光源とセンサとの距離

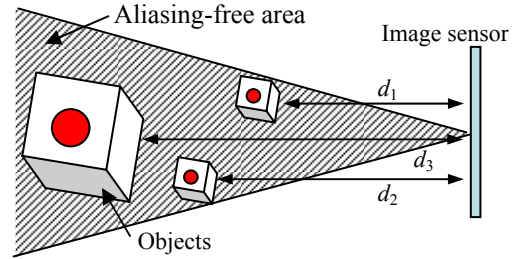


Fig.2 Aliasing-free area in the object space.

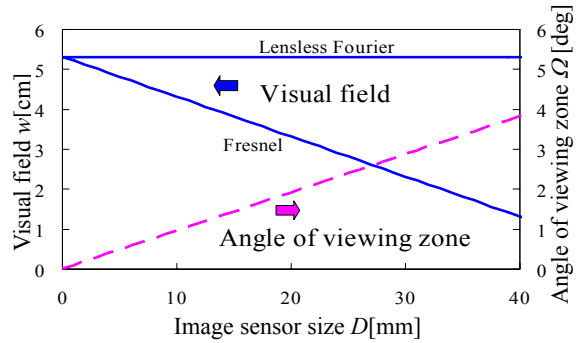


Fig.3 Visual field and angle of viewing zone as a function of the size of image sensors.

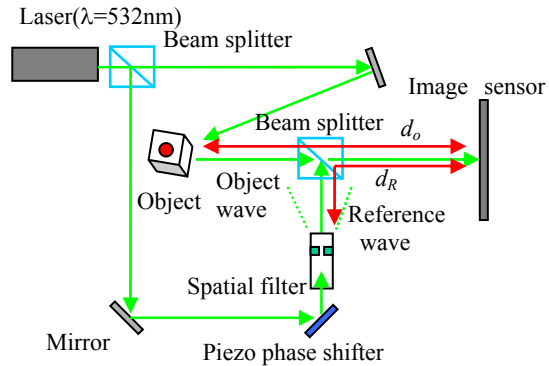


Fig.4 Experimental setup for phase-shifting digital holography.

Table.1 Parameters used for recording holograms.

Wavelength [nm]	532
Ratio of object to reference intensity	1:1
Distance between object and sensor [cm]	62
Shutter speed [s]	1/640

離である. フレネル型では参照光に平行光を用いるがレンズレスフーリエ型では球面波を用いる. また参照光の光路の途中にピエゾポジショナー付きミラーを挿入し, 光路長が $\lambda/4$ ずつ変化するようにこれを移動させることで位相シフトを行った. Table.1に記録に用いたパラメータを示す. ピエゾポジショナーの変位により参照光の位相量を $\varphi = 0$,

$\pi/2, \pi, 3\pi/2$ と変化させ、東芝テリー製のイメージセンサCSB4000CL-10A(2000×2000[pixel], 公称センサピッチ6.0×6.0[μm], CMOS sensor)で干渉縞を記録した。

4. 記録したホログラムの数値再生

イメージセンサで記録した位相シフト量の異なる4枚の干渉縞画像からセンサ面での物体光の複素振幅分布 $g(x, y)$ を求めた[4]. ここで物体とセンサの距離 d_o と参照光源と物体の距離 d_R が等しくない場合、位相の補正が必要であるが、本実験では $d_o \approx d_R$ としたため $g(x, y)$ の逆フーリエ変換のみで参照光点光源の存在する平面上での複素振幅分布を求めることができる[2].

また、レンズレスフーリエ型の場合、撮影可能領域内に物体を置き、 $d_o \approx d_R$ として撮影を行った場合、イメージセンサのピクセル数でどのような大型物体でも再生可能である。そのため、本実験では2048×2048[pixel]のサンプリング数で再生演算を行うことができ、非常に高速に再生画像を得ることができる。しかし、フレネル型の場合、Fig.5のようにイメージセンササイズより物体サイズが小さい場合には、取得した複素振幅分布をそのままフレネル変換することで再生像を求めることができるが、イメージセンササイズより物体サイズが大きい場合には、取得した複素振幅分布の周りにサンプリング範囲の拡張をしなければ、全体の再生ができない。そのため、計算する範囲が大きくなり計算時間が非常に長くなってしまふ欠点がある。

5. 数値再生像と考察

Fig.6(a)に位相シフトなしの再生像, Fig.6 (b)に位相シフトを用いた再生像を示す。撮影物体は、2.3×2.3[cm]の2次元画像であり、物体センサ間距離は $d=62[\text{cm}]$ である。Fig.6 (a)には、中心に非回折光による明点、左側に共役像と右側に真の像が見える。位相シフトを用いないレンズレスフーリエ型の再生像は、このようなツインイメージとなるため非常に見づらい再生像となる。しかし、位相シフトを用いたFig.6 (b)では、不要な非回折光と共役像が除去され、真の像のみが再生されることがわかる。

次に、位相シフトを用いた比較的大きな物体の再生像をFig.7に示す。Fig.7(a)は5×5[cm]角の2次元画像、Fig.7(b)は立体物で、3.0×4.5[cm]のペンギンの模型である。これらの再生像はノイズも少なく、位相シフトレンズレスフーリエ型で非常に高品質で鮮明な像が得られることが確認できた。

Fig.7(a)と同じ5[cm]角の2次元画像をフレネル型で撮影した場合の再生像をFig.8に示す。フレネル

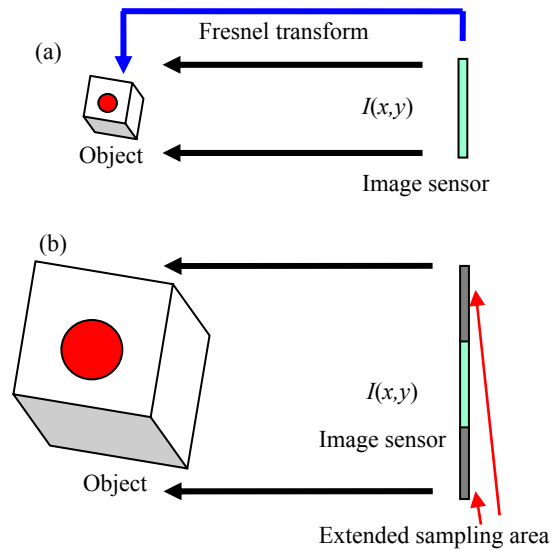


Fig.5 Numerical reconstruction of a small object (a) and large object (b) in Fresnel holograms.

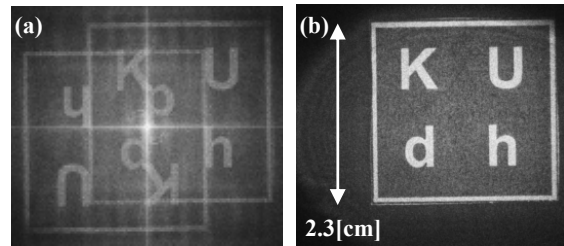


Fig.6 Numerical reconstruction of lensless Fourier holograms without (a) and with (b) phase-shifting.

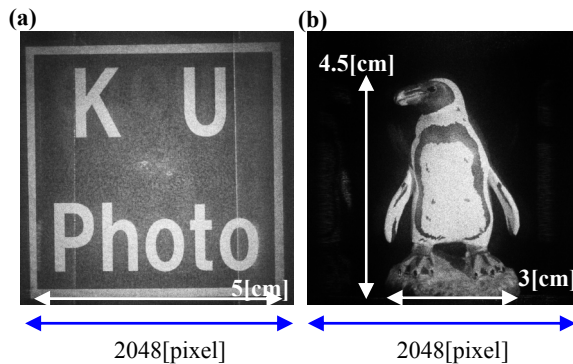


Fig.7 Numerical reconstruction of lensless Fourier holograms for large 2-D (a) and 3-D (b) objects.

型の場合、レンズレスフーリエ型に比べセンサ上の空間周波数が高いため、再生像の下と左側にエイリアシング誤差が生じた。(1)式と(2)式から、 $d=62[\text{cm}]$ で理論上の最大視野はフレネル型では、4.29[cm], レンズレスフーリエ型では5.49[cm] となり、理論値に近い大きさの物体を撮影できることを確認できた。また、5[cm]角の平面物体はセンササイズよりも大きいため、フレネル型ではFig.5のようにサンプリング範囲の拡張を行って再生した。そのためピクセル数が16384×16384[pixel]となり、再生計算時間として15分程度の時間を要した。一方、レンズレスフーリエ型では前述のとおりほぼ

センサのサンプリング数の逆フーリエ変換のみで再生計算できるため、3秒程度で数値再生が可能であった。

つぎにFig.9(a)のような奥行きのある物体の撮影を行なった。(b)が文字「K」に合焦した再生像でそこから奥行き6[cm]伝播させると文字「LASER」に合焦する再生像が得られる。このように1枚の複素画像のパラメータを変化させることで様々な再生像が得られることを確認できた。

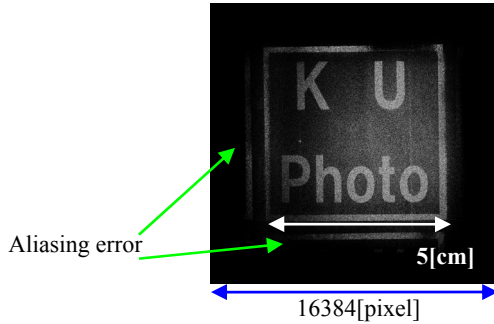


Fig.8 Numerical reconstruction of the Fresnel hologram for a large object.

6. まとめ

デジタルホログラフィでは、一般にイメージセンサの分解能が低いため、遠くにある小さな物体しか記録できない。つまり、視野角が狭い結果、数値再生時の視域も狭くなり、視点を変えた再生等、デジタルホログラフィの利点を活かした3次元物体画像データの取得が困難である。特に、一般に用いられるフレネル型では、センサ上の干渉縞の空間周波数が高くなり、視域を広げるために大型のイメージセンサを用いても、エイリアシング誤差を防ぐためには、物体をさらに遠方に置く必要が生じ、結果的に視域は増加しない。

一方、レンズレスフーリエ型では、イメージセンサ上の最大空間周波数を減少でき、広視野で撮影が可能である。また、最大空間周波数がイメージセンサのサイズに依存しないため、大型のイメージセンサを利用しても視野は狭くならず、視域を広げることができる。さらに、大型物体を撮影した場合にも、センサのピクセル数と同程度のサンプリング数で数値処理できるため、再生計算時間も短い。

以上より、レンズレスフーリエ型は、3次元画像の記録を目的としたデジタルホログラフィにおいて有効な手法であることが確認できた。

付録

Fig.10 にレンズレスフーリエ型における最大空間周波数を求めるための理論モデルを示す。物点 O が $(x, z)=(w/2, 0)$ にあるものとし、参照点光源 R

は原点にあるものとする。 $z=d$ にあるイメージセ

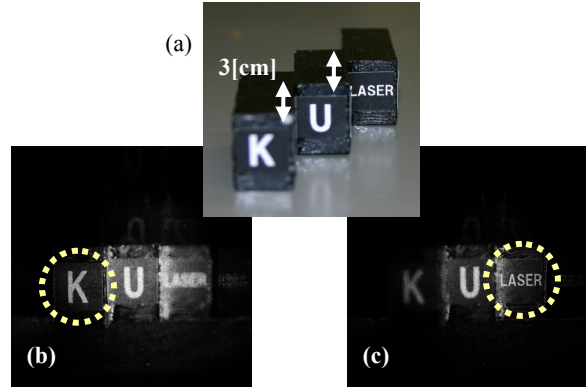


Fig.9 A 3-D object (a) and its numerical reconstruction (b), (c).

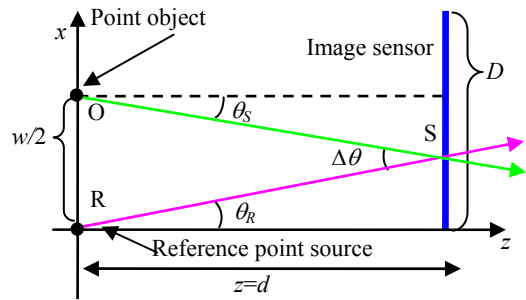


Fig.10 Theoretical model for estimating the maximum fringe frequency in lensless Fourier holograms.

ンサの大きさを D とし、センサ上の点 $S(w/2, d)$ を通る光線 OS と光線 RS が z 軸と為す角度をそれぞれ θ_s, θ_r とする。また、光線 OS と RS が為す角度を $\Delta\theta$ とすると、 $\theta_s = \theta_r$ のとき $\Delta\theta$ は最大となりイメージセンサにおける x 軸方向の干渉縞の波長 Λ_x は、

$$\Lambda_x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_s} \quad (3)$$

$$\sin \theta_s = \frac{w/4}{\sqrt{d^2 + (w/4)^2}} \quad (4)$$

となる。(4)式を(3)式に代入することで最大空間周波数 $f_{Lensless} = 1/\Lambda_x$ が求まる。

参考文献

- [1] C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten, W. Juptner: "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology", *Appl. Opt.* **38**, 4812-4820(1999).
- [2] 長岡, 富士川, 松島: "レンズレスフーリエ変換デジタルホログラフィによる三次元画像の広視野記録", 2005年信学会総合大会, D-11-83 (2005).
- [3] I. Yamaguchi, T. Zhang: "Phase-shifting digital holography", *Opt. Lett.* **22**, 1268-1270 (1997).
- [4] 中辻, 長岡, 松島: "位相シフトを用いたレンズレスフーリエ変換デジタルホログラフィ", 2006年信学会総合大会, D-11-72 (2006).
- [5] 大越孝敬: "三次元画像工学", 朝倉書店, pp. 4-5 (1991).