

合成開口デジタルホログラフィによる広視域 3次元画像情報の取得と数値再生

Acquisition and Numerical reconstruction of 3D images with wide viewing zone using synthetic-aperture digital holography

中辻達也 南雄大 松島恭治

Tatsuya Nakatsuji Yudai Minami Kyoji Matsushima

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

Only small and far objects can be recorded by conventional digital holography, because the maximum spatial frequency of the fringe pattern captured by the image sensor is considerably lower than that of classical film-holography. Therefore, if the area of the image sensor is small, it is practically impossible to change the visual point in numerical reconstruction. In this report, we present a new technique to record object fields by applying the synthetic aperture technique to phase-shifting lensless-Fourier digital holography we report last year. The technique makes it possible to capture object fields in a wide angle and therefore to obtain numerical reconstruction from different viewing angles. Furthermore, we demonstrate numerical reconstruction of clear images in a tilted plane by using rotational transformation of light fields.

Keywords: デジタルホログラフィ, 合成開口, 回転変換, レンズレスフォーリエ

1. はじめに

デジタルホログラフィは、被写体が発した光を振幅のみならず位相も記録する手法であり、特に位相シフト法を用いた場合には、共役像や非回折光による劣化の無い高品質な数値再生像が得られる。デジタルホログラフィで得た画像情報は位相情報を含んでいるため、数値再生時にピントを変えるなどの処理が可能になる。また、通常ホログラフィの光学再生像を視点を変えて観察したかのように、視点を変えた数値再生像が可能になるはずである。これができ

るためには、物体から発せられる光を広い角度範囲にわたって記録することが必要になる。しかしながら、現在得られるイメージセンサでは、そのセンサピッチによって決まる最大空間周波数の制限が強く、遠く離れた小さな物体しか記録できない。その結果、物体が発する光のうちごく狭い角度範囲の光を記録するだけであり、視点を変えるなどの処理は事実上不可能であった。

デジタルホログラフィによる3次元画像情報取得のこの様な問題点を克服するため、我々は位相シフト^[1]・レンズレスフォーリエ^[2]方式のデジタルホログラフィによる比較的大型の物体の撮影をすでに報告している^[3]。これは、イメージセンサのセンサピッチによる視野角の制限を緩和し、センサに比較的近い位置で物体光

中辻達也

<nakatsuji@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)

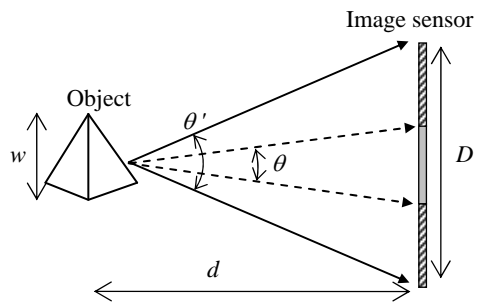


Fig. 1 Definition of viewing zone.

波の記録を可能にする手法である。これにより、物体が発した光を広い角度で記録することができ、数値再生時にわずかに視点位置を変えるなどの処理が可能になる。

しかしながら、この手法では例えば、幅 1.8 mm の物体を 20 cm の撮影距離で記録することができるが、イメージセンサのサイズが 12 mm であるため Fig.1 で定義する視域角は、わずか $\theta = 3.4^\circ$ になってしまう。

そこで本研究では、光軸に対して垂直な面内でシフトしたセンサから得た複数の画像を合成する合成開口法^[4]を用いて、実効センササイズを大型化して物体光波の記録を行った。これにより広い角度で物体光を記録し、数値再生時に視点を変化し、上下左右の異なった視点から見た再生像を得ることを試みた。また、本研究ではさらに傾いた面からの物体光波を回転変換^[5]を用いて数値再生し、あたかも正面から撮影したかのような再生像を得ることも試みた。

2. 合成開口法を用いた位相シフトレンズレスフーリエ型デジタルホログラフィ

Fig.2 に位相シフトレンズレスフーリエ方式の合成開口デジタルホログラフィの撮影光学系を示す。2000×2000 pixel でピッチ 6.0×6.0 μm のイメージセンサ(東芝テリー製 CSB4000CL-10A)をストローク 200 mm で位置決め精度 15 μm の 2 軸自動ステージを用いて光軸と垂直に移動し、

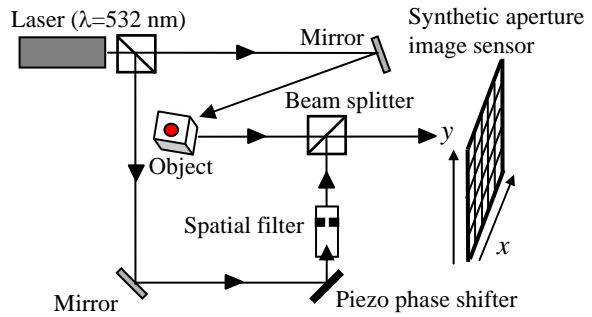


Fig. 2 Experimental setup.

複数枚の干渉縞を記録した。この時、ステージの移動量をセンササイズより小さくすることで画像間に重なりを持たせ、正確な重なり位置を検出している。具体的には x 軸、 y 軸方向ともに移動距離 8 mm で 5 枚ずつ撮影し、合計 25 枚の撮影を行った。この時、同一位置で Piezo 素子により位相シフト量を変えた 4 枚の干渉縞画像を撮影し、位相シフト法によりセンサ面での物体光の複素振幅分布を求めている。

3. ホログラムの数値合成処理

まず位相シフト法により求めた隣り合った複素振幅画像の相関関数を計算してピーク位置を求める。このピーク位置は、画像の重なり位置に対応しているため、それを基に隣り合った画像を重ね合わせていくことで Fig.3 のような合

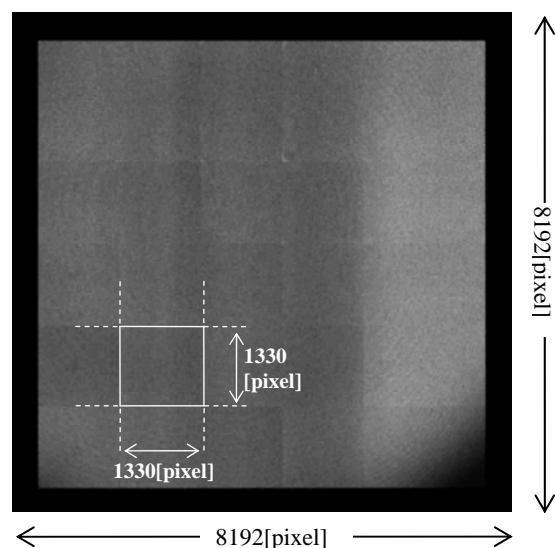


Fig.3 Composition of multiple complex images.

成複素振幅画像が得られる。このとき、 $D \approx 44$ mm となるため、Fig.1 に示すとおり $d = 20$ cm では視域角 $\theta' = 12.6^\circ$ となる。従って、合成開口法を用いない場合と比べて 3.7 倍広い視域を有することがわかる。なお、相関関数の結果から本研究で用いた自動ステージでは、 $5 \mu\text{m}$ 程度のずれで記録されていることがわかった。本研究では、フーリエ型デジタルホログラムを撮影しているので、合成した複素振幅画像を逆フーリエ変換するだけで再生像を得ることができる。

4. 数値計算による視点移動

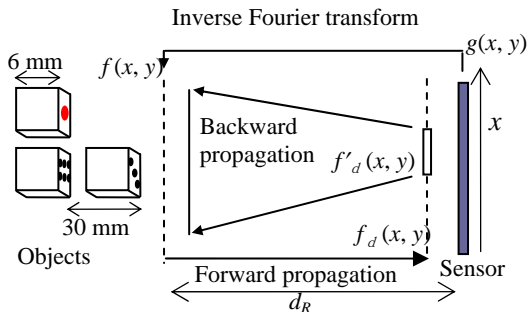


Fig. 4 Procedure for numerical reconstruction from different points of view.

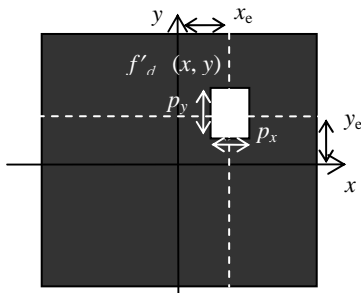


Fig.5 Definition of size and position of pupil.

Fig.4 に示すように、位相シフト法によって得られる合成複素振幅 $g(x, y)$ を逆フーリエ変換する。これにより、参照光源とセンサ間の距離 d_R だけセンサから離れた平面上で物体光の複素振幅分布 $f(x, y)$ が得られる。これは物体近傍の位置であるので、一旦、センサ近傍の位置まで距離 $d \approx d_R$ の伝播計算を行い複素振幅分布 $f_d(x, y)$ を得る。この分布 $f_d(x, y)$ 上で視点を置きたい位置 (x_e, y_e) で瞳の範囲 (p_x, p_y) だけ残して残りをゼロ値で

埋め、視点変化をシミュレートした。このように視点を設定した $f'_d(x, y)$ を再び物体近傍の位置まで逆伝播し、ホログラムの数値再生像を得た。

5. 合成開口法による数値再生像

参照光源センサ間距離 $d_R = 20$ cm として撮影を行った。ホログラムを瞳の大きさ $(p_x, p_y) = (3.2$ mm, 3.2 mm) で数値再生した結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a) の再生像を基準視点位置とすると、(b) は 33 mm 右によった視点からの再生像、(c) は 33 mm 上によった視点からの再生像である。「6 の目」は「3 の目」の背後にあるので (a) の再生像では「6 の目」を確認することが出来ないが、(b) や (c) の再生像では「6 の目」が確認できる。これより上下左右ともに明瞭な視点変化を確認できる広視域 3 次元画像情報が取得できていることを確認できた。

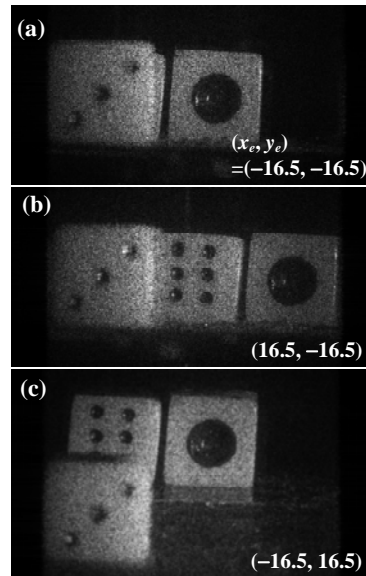


Fig. 6 Numerical reconstructions from different angles. Units: mm.

6. 傾いた平面の数値再生像

Fig.7(a) のようにセンサ面に対して約 70° 傾けて設置した平面画像 A と B からの光 $f(x, y)$ を本手法で撮影した。画像 A と B のサイズはどちらも 10×10 mm² であり、30 mm の間隔を空けて設

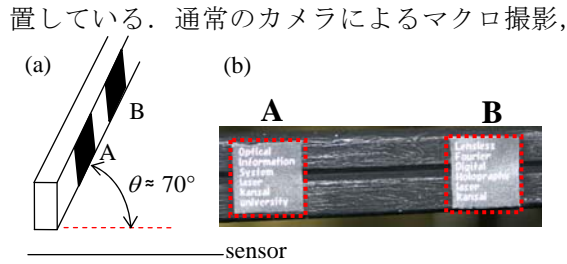


Fig. 7 Planar objects on tilted plane.

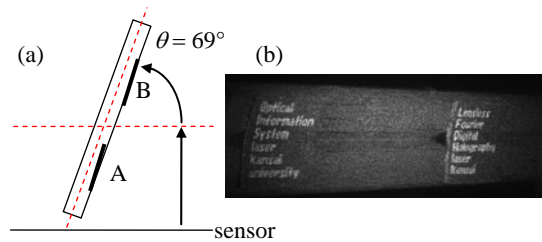


Fig. 8 Numerical reconstruction of planar objects on tilted plane.

あるいは通常のデジタルホログラフィではこの2つの画像を明瞭に再生することは困難である。そこで本研究では光波の回転変換^[5,6]を用いて数値再生を行った。そのためにはまず Fig.8(a)のようにAとBの中間位置まで取得した複素振幅画像 $f(x, y)$ を逆伝播し、次に y 軸の周りで $\theta = 69^\circ$ の回転変換を行った。その結果を Fig.8(b)に示す。このようにあたかも正面から撮影したかのように傾いた平面上の画像を再生することができた。

ここで再生像に若干の歪みが生じているが、本研究では $N.A$ が低い、すなわち d_R が D より大幅に大きいと仮定して、複素振幅分布 $f(x, y)$ の逆フーリエ変換で物体光波を再生しているためではないかと考えられる。実際、合成開口した場合には $N.A = 0.11$ となり、合成開口なしの場合の $N.A = 0.03$ に比べてかなり高い $N.A$ となっている。この結果、再生像にわずかな歪みが生じると考えられる。

7. まとめ

本研究では、位相シフトレンズレスフーリエ型デジタルホログラフィでセンサ周辺部の空

間周波数が増加しない利点を生かし、合成開口の手法を用いて擬似的に巨大なイメージセンサを構成して数値再生時の視域を拡大した。その結果、取得したホログラムデータから視点の異なった数値再生像が得られることを確認した。また、光波回転変換の手法を用いることで、傾いた面からの明瞭な数値再生を行うことができることを確認した。なお最後に、位相シフト・レンズレスフーリエ型デジタルホログラフィを3原色に拡張して得たカラー数値再生像を Fig.9 に示す。これにはまだ合成開口法を用いていないが、同様な手法で広視域3次元カラー画像情報の取得が可能であると考えている。



Fig.9 Numerical reconstruction in color.

参考文献

- [1] I. Yamaguchi, T. Zhang: "Phase-shifting digital holography", *Opt. Lett.* **22**, 1268-1270 (1997).
- [2] 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).
- [3] 中辻, 長岡, 松島: "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", 3次元画像コンファレンス2006, 113-116 (2006).
- [4] R. Binet, J. Colineau, and J. Leheureau, "Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography", *Appl. Opt.* **41**, 4489-4496 (2002).
- [5] K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves", *J. Opt. Soc. Am.* **A20**, 1755-1762 (2003).
- [6] K. Matsushima, "Formulation of rotational transformation of wave fields and the application to digital holography", to be published.