合成開ロデジタルホログラフィで記録した実物体の CGH

有馬 恭旭[†] 松島 恭治[‡] 中原 住雄[‡]
 †関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科
 ‡関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 E-mail: † arima@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし デジタルホログラフィにより実在の物体の光波をデジタル的に記録することができる.しかし,イメージセンサの解像度が低いため,記録した光波を CGH として光学再生するにはそのままではピクセルピッチとピクセル数が不十分である. そこで本研究では,位相シフトレンズレス合成開口デジタルホログラフィを用いて高分解能な光波情報を取得し,それを超高解 像度 CGH として光学再生することを試みた.

キーワード デジタルホログラフィ,位相シフト,合成開口,計算機合成ホログラム

Computer-generated holograms of real objects captured by using synthetic-aperture digital holography

Yasuaki ARIMA[†] Kyoji MATSUSHIMA[‡] Sumio NAKAHARA[‡]

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University
 Department of Mechanical Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan E-mail: † arima@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract The wave field of real objects can be recorded by using digital holography. However, the resolution of common image sensors is too low to reconstruct the captured object field by high-definition CGHs, because both the pixel pitch and the number of pixels are insufficient for optical reconstruction by such high quality CGHs. Therefore, the technique of phase-shifting lensless synthetic-aperture digital holography is used for capturing the object field. The captured field is binary-encoded after the numerical interference and then reconstructed as the amplitude hologram in high resolution.

Keyword Digital holography, Phase-shifting, Synthetic-aperture, CGH

1. はじめに

計算機合成ホログラム(以下, CGH)は仮想物体からの光波の回折と干渉を計算機上でシミュレートし, ホログラム干渉縞パターンを作成する手法である. CGHでは、多くの場合、数値モデルから物体光波を求 める.テクスチャマッピングやシェーディングなどの レンダリング技術を駆使することにより、実物体に近 い、リアリティのある光学再生が試みられているもの の、その再生像はやはり CG のそれであり、実物体と は似て非なるものである.

そこで本研究では、実在の物体の光波を高解像度 CGHに組み込むことを試みた.本研究では実物体の光 波をデジタル的に記録するために位相シフトデジタル ホログラフィを用いた[1].しかし、高品質な CGH が 数ギガピクセルの総ピクセル数と 1 μm 程度のピクセ ルピッチを必要のするのに対して,現行のイメージセンサのそれは高々数メガピクセルと数µmであるため, ピクセル数,ピクセルピッチとも不十分である.そこ で本研究では,レンズレスフーリエ型デジタルホログ ラフィと合成開口法[2,3]を用いることでピクセルピ ッチとピクセル数を超高解像度 CGH に適合させた.

本研究では、この手法により高解像度 CGH の条件 を満たすよう取得した実物体の光波を参照光波と数値 的に干渉することによりホログラム干渉縞を発生し、 高解像度 CGH として光学再生することを試みた.

レンズレスフーリエ型デジタルホログラフィ で取得する光波のサンプリング間隔

Fig.1に示すようにレンズレスフーリエ型デジタル ホログラフィでは参照光波として球面波を用いる.参 照光源(点光源)はイメージセンサから距離*d*_R離れた



Fig.1 レンズレスフーリエ型デジタルホログラフィ

位置にあり、撮影物体もほぼ同じ距離だけ離れた位置 に配置している.点光源の位置を原点に取ると、イメ ージセンサで記録した干渉縞をフーリエ変換すること により(x, y, 0)平面上で物体光波が求まり、その時のサ ンプリング間隔Δx, Δyは以下の式で与えられる[3].

$$\Delta x = \frac{\lambda d_R}{N_x \delta_x} \qquad \Delta y = \frac{\lambda d_R}{N_y \delta_y} \tag{1}$$

ここで、 δ_x 、 δ_y はセンサのピクセルピッチ、 N_x 、 N_y は ピクセル数であり、 λ はレーザの波長、 d_R は点光源-セ ンサ間距離である.

従って、レンズレス型デジタルホログラフィで記録 した光波のサンプリング間隔はイメージセンサのそれ とは異なり、点光源-センサ間距離を減少するか総ピク セル数を増加することによりピクセルピッチを減少で きることになる.



3. 合成開口

光学系の配置の制限のため,点光源-センサ間距離の 短縮には限度がある.従って,記録光波のサンプリン グ間隔 Δx, Δy を減少するには,ピクセル数 N_x, N_y を増加する必要がある.そこで本研究では,実効的に センサピクセル数を増加するため,Fig.2(a)に示すよう にセンサを移動して干渉縞の記録を行い,複数の干渉 縞を合成する合成開口の手法を用いた.

この時,もしも平面波参照光を用いるフレネル型に すると,光軸から離れた位置での干渉縞空間周波数が 高くなるため記録が困難になる問題点が生じる.それ に対して本研究で用いたレンズレスフーリエ型では, 位置によって干渉縞空間周波数が大きく変化しないた め,合成開口で広い範囲の干渉縞が取得可能である.

合成開口では、機械的なセンサ移動の誤差がセンサ のピクセルピッチよりも大きいため、そのままでは干 渉縞を正確につなぎあわすことができない. そのため 本研究では、Fig.2(b)に示すように意図的にオーバーラ ップする領域を作り、相関関数を用いてセンサ移動量 を正確に求める手法を用いている[4].

4. 物体光波の記録方法

Fig.3 に記録光学系を示す. 波長 532[nm], 出力 100[mw]の緑色 DPSS レーザをビームスプリッタ BS1 で2方向に分割し,空間フィルタ SF1と SF2で広げて 物体を照明した.物体光は SF3 で発生した球面波参照 光と干渉させ,干渉縞をイメージセンサで記録した. この時,点光源-センサ間距離を 21.5[cm]とした.また, 合成開口を行うために 2 軸自動ステージを用いてイメ ージセンサを移動して干渉縞の記録を行なった.なお, 参照光の光路長を変えて位相シフトを行うため, ミラ ーM3 にはピエゾ素子を取り付けている.本研究では イメージセンサとして 3000×2200[pixel], ピクセルピ ッチ 3.5×3.5[µm]の Lumenera 社製 Lw625 を用いた.

実験では、一つのセンサ位置につきピエゾ素子によ って位相シフト量の異なる3枚の干渉縞を撮影して複 素振幅分布を求めた.次に、前節で述べたオーバーラ ップ領域の確保を考慮した一定距離だけセンサ位置を 変え、この撮影を繰り返した.



5. 記録した物体光波

Fig.4 は,位相シフト法で求めた2枚の複素振幅画像 (複素干渉縞)の相関画像であり,(a)と(b)はそれぞれ横 方向と縦方向の2枚の画像の相関結果である.図中に 円で示したピークの位置から画像間の正確な重なり位 置を求め合成を行っている.

Fig.5(a)にはこのようにして求めた合成複素振幅画 像の振幅画像を,また(b)には(a)の画像をフーリエ変換 して求めた(x, y, 0)平面上における物体光波の振幅像 を示す. Table 1 にはこの時の記録パラメータを示す. Fig.5(a)は、8×12=96枚の複素振幅画像を合成した結 果である.ここで,各画像間のオーバーラップ領域が およそ 1[mm]となるようにステージを動かして撮影を 行っている. Fig.5(a), (b)に示すような各画像間の相関 画像のピーク座標を求めて合成を行った結果, 一つの ステージ位置で取得される単一複素振幅画像(セグメ ント)の実効的な大きさはおよそ 1914×2714[pixel]と なった.従って、合成複素振幅画像のピクセル数は 22005×23254[pixel]となるが、 演算処理に FFT を用い るため、この画像を 32768×32768[pixel]の画像に埋め 込んでいる. そのため, (1)式より, (x, y, 0)平面におけ る物体光波 Fig.5(b)のピクセルピッチは 1.0×1.0[µm] となる.

Table 1 合成開口パラメータ

複素振幅画像ピクセル数	22005×23254[pixel]
全画素ピクセル数	32768×32768[pixel]
センサピッチ	$3.5 \times 3.5 [\mu m]$
物体光波ピッチ	$1.0 \times 1.0 [\mu m]$
合成枚数	8×12[枚]
オーバーラップ領域	1[mm]



Fig.4 相関画像の例[(a)横方向,(b)縦方向]



Fig.5 (a)合成複素振幅画像 (b)取得した物体光波の振幅像

6. CGH の作成方法

Fig.6に作成した CGH の 3D シーンを, Table 2に CGH のパラメータを示す. CGH をフレネル型とするため, Fig.6に示すように,前節の合成開ロデジタルホログラフィで記録した物体光波から 10cm 離れた位置にホログラム面を配置した. そのため, *z* = 10[cm]のホログラム面まで記録物体光波の伝搬計算を行い, これをホログラムの物体光波とした.

本研究では空間コヒーレンスの高い LED 光源で CGHを再生することを想定したため、参照光波を球面 波とした.物体光波を O(x, y)、参照光波を R(x, y)とす る時、干渉縞強度 I(x, y)は、

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^{2}$$

$$\cong \operatorname{Re}\{O(x, y)R^{*}(x, y)\} + B$$
(2)

と表せる.ここで, B は干渉縞強度が負になることを 防ぐオフセットであるが,本研究では最終的なホログ ラムが 2 値振幅型となるため,B = 0とし, $Re{OR*}$ を単純にゼロ閾値で 2 値化してコーディングを行い, 干渉縞パターンを作成した.





Fig.7 CGH のシミュレーション再生像

7. CGH のシミュレーション再生

CGH を作製する前に波動光学的再生シミュレーション[5]により再生像の確認を行った.シミュレーション再生像を Fig.7 に示し,その時に用いたパラメータ

を Table 3 に示す. なお, このシミュレーションでは 人間の眼に近いパラメータを使用している. この結果 より, 位相シフト合成開ロデジタルホログラフィで取 得した実物体の光波が高解像度 CGH として再生でき ることがわかる.

Table 2 CGH のパラメータ

ピクセル数	32768×32768[pixel]
ピクセルピッチ	$1.0 \times 1.0 [\mu m]$
ホログラムサイズ	$3.28 \times 3.28 [cm^2]$
参照光波長	532[nm]
点光源位置	(0, -30, -150)[mm]
Table 3 シミュレーションパラメータ	
結像面ピッチ	$0.5 \times 0.5 [\mu m]$
瞳の大きさ	6[mm]
瞳~結像面間距離	24[mm]
ホログラム~視点間距離	240[mm]
再生照明光波長	632.8[nm]
占水道位墨	(0, 20, 150)[]

8.まとめ

本論文では合成開ロデジタルホログラフィで記録 した実在の物体の光波から超高解像度 CGH を作成し, シミュレーションによってその再生を確認した.その 結果,合成開口を行っ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により,ピクセルピッチ 1.0 ×1.0[µm]で 32K×32K の超高解像度の CGH が作成でき, 実在の物体光波を再生できることを確認できた.今後 は,実際に CGH を作製し,その光学再生を確認する 予定である.

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助成 を受けたものである.

文 献

- [1] I. Yamaguchi, T. Zhang: "Phase-shifting digital holography", Opt. Lett. 22, 1268-1270(1997).
- [2] 中辻達也,南雄大,松島恭治:"合成開ロディジタ ルホログラフィによる高視域3次元画像情報の取 得と数値再生",3D コンファレンス2007 講演論文 集,81-84(2007).
- [3] T. Nakatsuji, K. Matsushima : "Free-Viewpoint Images Captured Using Phase-Shifting Synthetic Apeture Digital Holography", Appl. Opt. 47, 136-143(2008).
- [4] R. Binet, J. Colineau, J. Lehureau: "Short-range synthetic aperture imaging at 633nm by digital holography", Appl. Opt. 41, 4489-4496(2002).
- [5] 村上和也, 圓山泰佑, 松島恭治: "全方向視差 CGH の波動光学的シミュレーション", 3D コンファレンス 2009 講演論文集, 105-108(2009).