

デジタル化ホログラフィによる実在物体と仮想物体の 混合 3次元再生

Reconstruction of Mixed 3D Scenes of Virtual and Real Objects by Digitized Holography

有馬恭旭¹ 松島恭治¹ 中原住雄²
Yasuaki Arima¹ Kyoji Matsushima¹ Sumio Nakahara²

¹ 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

² 関西大学 システム理工学部 機械工学科

²Department of Mechanical Engineering, Kansai University

ABSTRACT

A novel technique is proposed for replacing the whole process of classical holography by its digital counterparts; the object wave is recorded by digital holography (DH) and reconstructed by computer generated hologram (CGH). Capturing wave-fields of real-existent objects by DH is not easy especially in high-definition CGHs, because the resolution and pixel size of current image sensors are not enough for requirements for high-definition CGHs. To overcome the problem, the technique of phase-shifting lensless synthetic-aperture digital holography is used for capturing the object field. A hybrid CGH reconstructing real-existent object mixed with CG-modeled virtual objects is actually demonstrated.

Keywords: 計算機合成ホログラム, デジタルホログラフィ, 合成開口, レンズレスフーリエ型, 光波遮蔽

1. はじめに

古典的なホログラフィでは、銀塩フィルムなどの感光材料を用いて干渉縞を記録し、その回折作用により立体像を再生していた。しかし、最近のコンピュータ技術と微細加工技術の発展により、計算機上でホログラム干渉縞パターンを数値合成する計算機合成ホログラム(CGH)が大規模・高解像度化し、これによって深い奥行き感のある美しい立体像が再生できるようになってきた[1]。しかしながら、このような従来のCGHで再生されるのはCG等の数値モデルによる架空の物体のみであり実在物を含む3Dシーンを再生することはできなかった。

CGHで再生されるシーンに実在物体を混合する手法の一つに3Dスキャナーにより3次元形状を取り組む手法もあるが[2]、これはやはりCGのような数値モデルの延長であり、実在物体とは言えない問題点があった。実在の光波を撮影し、3Dシーンに組み込む方法の1つとしてイメージセンサを用いたデジタルホログラフィ(DH)に

よりホログラム干渉縞を取得する方法が考えられる。しかし、既存のイメージセンサでは分解能、解像度がともに不十分であるため、高解像度CGHに適した光波を取得することができないという問題点があった。

そこで本研究では、レンズレスフーリエ型合成開口DH(Lensless-Fourier synthetic aperture digital holography, LFSA-DH)[3,4]を用いることにより、センサの物理的分解能の変換と解像度の増大を図り[5]、超高解像度CGHに適した実在物体の光波の取得をおこなった。また、取得した光波をデジタル画像やCGモデルで与えた仮想の3Dシーン内に挿入し、超高解像度CGHとして空間的3次元像の再生をおこなった。

これらの手法を用いて作成したホログラムは、干渉により光波を記録し回折によりそれを再生するという古典的なホログラフィを完全にデジタル化したものとなっている。そこで本研究では、これをデジタル化ホログラフィ(Digitized Holography)と呼んでいる。デジタル化ホログラフィでは、古典的ホログラフィでは不可能な、撮影後のデジタル編集や仮想シーンとの合成が簡単に行える。また通常のCGHと同様にデジタルデータ特有の編集・蓄積・伝送が可能である。本報告ではこれらの技術および実際にこのデジタル化ホログラフィで作成した超高解像度CGHの光学再生像を示す。

有馬恭旭

arima@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)

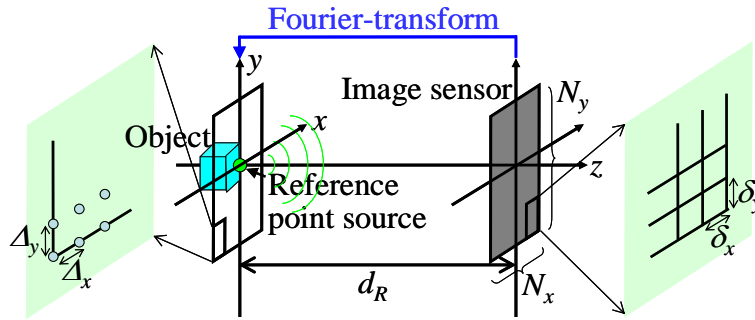


Fig.1 Schematic geometry of lensless Fourier digital holography.

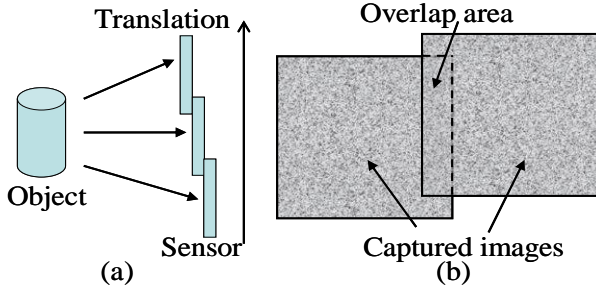


Fig.2 Synthetic-aperture digital holography.

2. 物理的分解能の変換と解像度増大の原理

CGH で良好な再生像が得るためには、広い視野角と大きなホログラムサイズが必要である。視野角は干渉縞の物理的分解能で決まるため、良好な再生像が得られた最初のポリゴン法高解像度 CGH である The Venus では、そのピクセルピッチは $1.0 \mu\text{m}$ 、ピクセル数は 32 億ピクセルに達している。それに対して、現行のイメージセンサは、分解能も解像度もはるかに低いため、そのままでは、高解像度 CGH として再生可能な物体光波を撮影できない。そのため LFSA-DH により分解能の変換と解像度増大を行った。

レンズレスフーリエ型 DH の構成を Fig.1 に示す。このタイプの DH では、参照光波に球面波を用い、その中心をほぼ撮影物体と一致させる。その結果イメージセンサではフーリエ型ホログラムが記録されるため、位相シフトを用いて取得した複素干渉縞をフーリエ変換することで、参照点光源を含む $(x, y, 0)$ 平面(像面)での物体光波が求まる。その時の物体光波のサンプリング間隔は以下の式で表すことができる。

$$\Delta_x = \frac{\lambda d_R}{N_x \delta_x}, \quad \Delta_y = \frac{\lambda d_R}{N_y \delta_y} \quad (1)$$

ここで、 λ はレーザの波長、 d_R は点光源とイメージセンサの間の距離、 $N_x \times N_y$ はサンプリング数、 $\delta_x \times \delta_y$ はセンサピッチを表している。

(1)式からわかるように、レンズレスフーリエ型 DH で記録した光波のサンプリング間隔はセンサピッチと異なり、点光源-イメージセンサ間距離を減少するか、サンプリング数を増加させることで、フーリエ変換後の

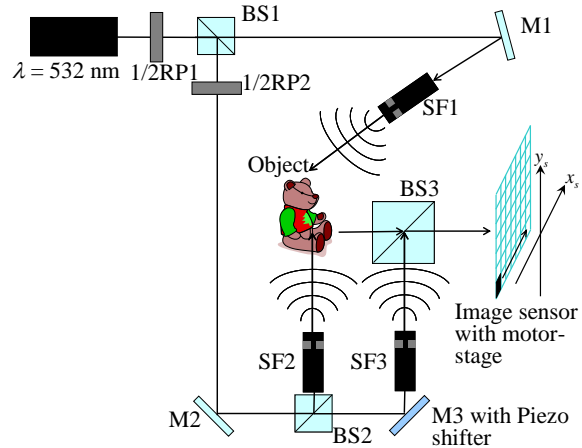


Fig.3 The experimental setup for capturing large-scaled wave-fields by the LFSA-DH. M: mirror, BS: beam splitter, RP: retarder plate.

光波(物体光波)のサンプリング間隔を減少させることができる。また、この型の DH では、光軸から離れた位置でも干渉縞空間周波数がそれほど大きく変化しないため、イメージセンサを物理的に移動させて光波記録面積を増大する合成開口法を用いることができる。

具体的には、合成開口 DH では自動 2 軸ステージを用いてイメージセンサを機械的に動かし、Fig.2(a)に示すようにそれぞれ異なる位置での光波の取得を行なう。この時、自動ステージの機械的な移動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せることができない。そのため、センサの移動量をセンササイズより小さくし、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設けている。このオーバーラップにより、隣り合った記録画像間の相関関数を用いてセンサ移動量を正確に求めている。これにより、複数の干渉縞をつなぎ合わせて単一の大規模な干渉縞を記録することができる。

3. 物体光波の記録実験

本研究で用いた記録光学系を Fig.3 に示す。本研究では位相シフト法を用いて直接像のみの光波複素振幅分布を取得するため、ミラー M3 にはピエゾ素子を取り付けている。撮影では、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を変えた 3 枚の干渉縞を取得して複素振幅分布を求める。イメージセンサとしてセンサピッチ $3.5 \mu\text{m}$ でセンササイズ 3000×2200

Table 1 Parameters for capturing the large-scaled field.

Wavelength (λ)	532nm
Sensor pitches ($\delta_x \times \delta_y$)	3.5 μ m \times 3.5 μ m
Sampling intervals ($\Delta_x \times \Delta_y$)	1.0 μ m \times 1.0 μ m
Total number of samplings ($N_x \times N_y$)	32,768 \times 32,768
Distance of reference point source (d_R)	21.5cm

pixel の Lumenera 社製 Lw625 を用いたため、前節で述べたオーバーラップ領域の確保を考慮して水平方向に 9.5 mm、垂直方向に 6.7 mm だけセンサを移動し、この撮影を繰り返した。また、超高解像度 CGH に適合したサンプリング間隔 1.0 μ m の光波を取得するため、(1)式から逆算して、点光源-イメージセンサ間距離を $d_R = 21.5$ cm に設定している。これらのパラメータを Table.1 にまとめる。

4. 記録した物体光波

取得した複素振幅画像を一枚に合成した振幅像を Fig.4(a)に、またそれをフーリエ変換して求めた像面上の物体光波を振幅像として(b)に示す。この結果からわかるとおり、実験では 8×12 枚の干渉縞を一枚に合成しており、有効な光波取得面積は 77×80 mm²となる。この取得光波は、FFT を用いるために $32,768 \times 32,768$ のサンプリンググリッド中に埋め込まれている。そのため、FFT 後に得られた(b)では(1)式からサンプリング間隔はちょうど 1.0 μ m となる。

なお、Fig.4(b)の振幅像では、被写体の周辺でボケが生じているが、これは像面が被写体の熊の置物の目の辺りに一致し、記録光波が高分解能なため像面から離れると急激に回折するためである。

5. 仮想物体と実在物体が混在する CGH

5.1 仮想物体と実在物体が混在する3D シーン

作成した高解像度 CGH の 3D シーンを Fig.5 に示し、そのパラメータを Table 2 に示す。3D シーンでは、背景としてデジタルイメージ(イラスト)を配置し、LFSA-DH で取得した実物体光波をその前に組み込んでいる。また CG モデルの架空の蜂を実在物体光波(熊)の手前に3匹配置している。

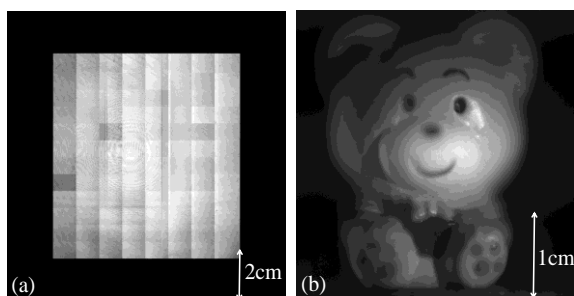


Fig.4 Amplitude images of the captured (a) and Fourier-transformed field (b).

Table 2 Parameters of the “Bear II”.

Number of pixels	65,536 \times 65,536
Pixel pitches	1.0 μ m \times 1.0 μ m
Viewing angle	37 $^\circ$ \times 37 $^\circ$
Height of real objects statue	30mm
Height of 3D objects statue	10mm
Dimension of wallpaper (W \times H)	65mm \times 65mm

ここで、実在物体光波は 2 重化してシーン内に配置している。つまり被写体(熊)が 2 体登場するシーンとして構成している。このようなデジタル編集は通常の写真ではごく普通であるが、従来の古典的なホログラムでは不可能であり、デジタル化ホログラム特有の特徴であると言える。

5.2 シルエットマスクによる光波遮蔽

実在物体の後方から入射する光波が実在物体の光波と重なって、半透明に再生されないように光波を遮蔽しなければならない。そこで CGH で光波遮蔽を行なう際に用いられているシルエット法[6,7]を実在物体にも適用した。そのためには、Fig.6 に示すように、まず実在物体光波を配置する位置まで背景画像の光波を数値的に伝搬する。次に物体光波の振幅像から作成した 2 値のシルエットマスクを物体光波面に乗算する。その後背景画像光波に物体光波を加算する。これにより物体で光波が遮蔽され、物体が半透明に再生されることを防ぐことができる。

実物体から作成したシルエットマスクを Fig.7(b)に示す。この画像は Fig.4(a)の実験で取得した光波の中心部分の一部だけを切り取り、フーリエ変換を行なって得られた Fig.7(a)の振幅画像から作成している。これは、取得光波全体から再生すると Fig.4(b)のように振幅像にボケが生じエッジの抽出が困難になるためである。

6. 光学再生像とまとめ

Fig.8 は実際に作成した高解像度 CGH である“Bear II”を光学再生し、複数の視点から撮影したものである。この再生像からわかるとおり、実際にこのような 3D シーンの模型を作製して撮影したかのような再生像を得ることができる。

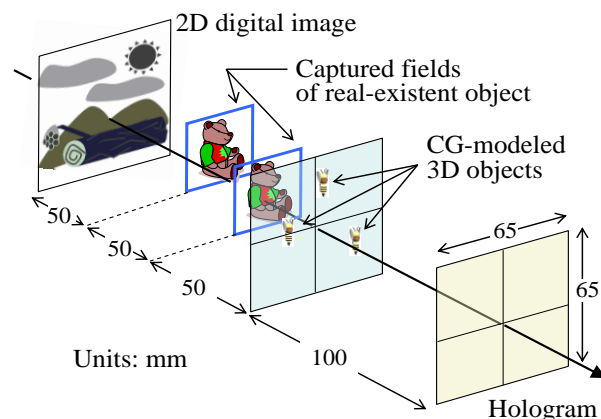


Fig.5 The mixed 3D scene of “Bear II” including the field of the real-existent object and the CG-modeled virtual object

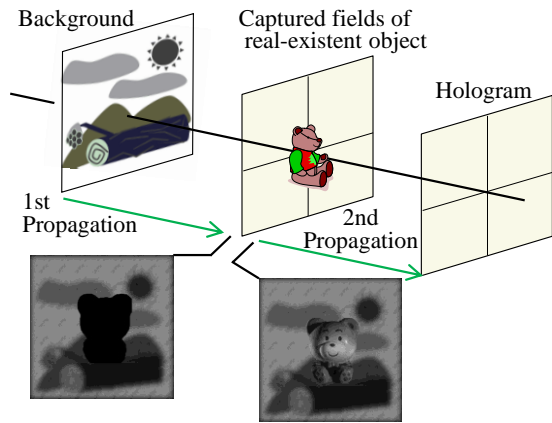


Fig.6 Silhouette masking of the background field

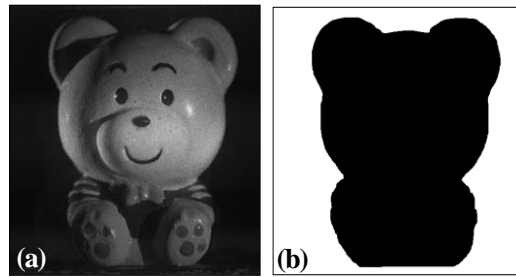


Fig.7 (a) The amplitude image obtained from a small part of the captured field. (b) The silhouette mask produced from the amplitude image.

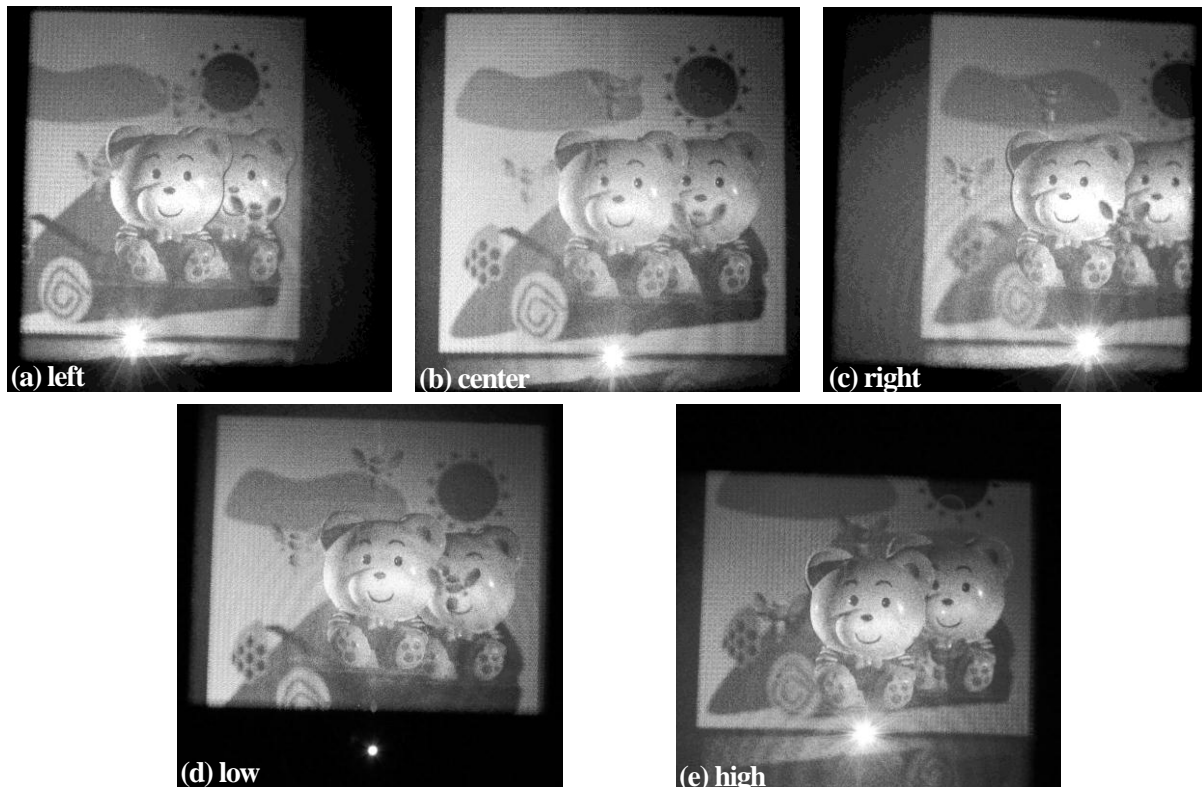


Fig.8 Photographs of optical reconstruction of the “Bear II” created for the mixed 3D scene including real-existent and virtual objects. Photographs (a) – (e) are taken from different view points.

本研究では、レンズレスフーリエ型合成開口デジタルホログラフィ(LFSA-DH)により超高解像度 CGH に適合した高分解能かつ超高解像度な実在物体光波を取得した。また、取得した実在物体の光波と CG の仮想物体を計算機上で組み合わせ、新たな架空の 3D シーンを構成し、実在物体と仮想物体のハイブリッドな高解像度 CGH を作成できることを示した。

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。

参考文献

[1] K. Matsushima, S. Nakahara: Appl. Opt. 48, H54-H63

(2009).
 [2] H. Nishi, K. Higashi, Y. Arima, K. Matsushima, S. Nakahara: SPIE 7957, 79571A (2011).
 [3] T. Nakatsuji, K. Matsushima: Appl. Opt. 47, 136-143 (2008).
 [4] R. Binet, J. Coloneau, J. Leheureau: Appl. Opt. 41, 4489-4496 (2002).
 [5] 有馬, 松島, 中原: HODIC Circular 29, No.3, 5-8 (2010).
 [6] K. Matsushima, A. Kondoh, SPIE 5290, 90-97 (2004).
 [7] 近藤, 松島: 信学論 J87-D-II, 1487-1494 (2004).