

# フーリエ変換光学系における自由な奥行きで再生可能な計算機合成ホログラム Computer-Generated Hologram Allowing for Reconstruction at Arbitrary Depth in Fourier Transform Optical System

佐藤 裕典<sup>†</sup> 坂本 雄児<sup>†</sup>  
Yusuke Sato Yuji Sakamoto

## 1. まえがき

計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) は、ホログラフィにおける物体の記録過程を計算機でシミュレートして干渉縞のデータを作成、フィルムや LCD (Liquid Crystal Display) 等の表示装置に出力することで、人間の視覚特性を満たす自然な立体像を表示できる技術である。しかし、現状の表示装置のピクセルピッチでは、干渉縞を表示するには不十分であり、再生の際の光の回折角は  $2, 3^\circ$  程度しか得られない。その結果、「視域・視野が制限される」といった問題が発生する。ここで、視域とは再生像全体を見ることのできる視点の範囲、視野とはある視点から見られる再生像の大きさのことを指す。これらが制限されると、臨場感のある3次元像を見ることができない。この問題に対して、様々な研究がなされている [1-3]。中でも、本稿ではフーリエ変換光学系を使用する手法に着目する [3]。この光学系を用いることで、表示装置のピクセルピッチによらず、視域・視野が拡大される。しかし、これまでに報告されている計算方法では、再生像の奥行き方向の自由度が制限されていた。そこで、本稿では、フーリエ変換光学系において、自由な奥行きでの再生を可能とする CGH 計算法を提案する。

## 2. フーリエ変換光学系

CGH を用いた3次元像の再生は、通常、表示装置にレーザー光や LED からの光を照射することで行われる。本稿では、通常の再生光学系にレンズを加えた、フーリエ変換光学系を用いる。この光学系では、レンズにより光を収束させることができるため、表示装置の回折角以上の角度の光を得ることができる。通常の光学系を図1、フーリエ変換光学系を図2に示す。図1の光学系の視野角  $\theta_1$  はピクセルピッチにより定まる一定の角度であり、光の波長を  $\lambda$ 、表示装置のピクセルピッチを  $p$  で表すと、以下の式で表される。

$$\theta_1 = 2 \sin^{-1} (\lambda/2p) \quad (1)$$

また、図2の光学系の最大視野角は以下の式で表される。

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} (\lambda/2p + L/2f) \quad (2)$$

ここで、 $L$  は表示装置の表示面の幅、 $f$  はレンズの焦点距離とする。これらの式からも、フーリエ変換光学系においては、表示装置の幅やレンズの焦点距離を変えることで視野角を拡大できることがわかる。しかし、これまで CGH の計算法が確立しておらず、像の再生はホログラムの前方に限定されていた。

## 3. 提案手法

### 3.1 物体の計算法

本稿の CGH の計算では、仮想物体が点光源で構成される物として扱い、参照光はレンズの焦点の位置に配置するものとする。 $i$  番目の点からの光の伝搬を考えたとき、ホログラム面上の複素振幅  $u_i(x, y)$  は以下の式で表される。

$$u_i(x, y) = e^{-jkr_i} \quad (3)$$

ここで、 $r_i$  は光の伝搬距離を表し、像を再生させる

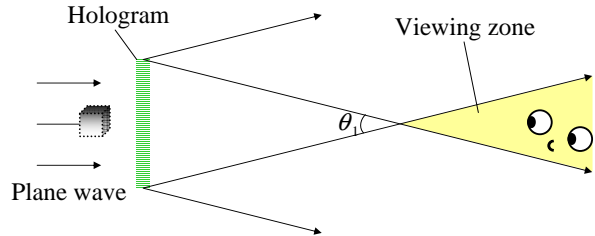


図1 通常の再生光学系

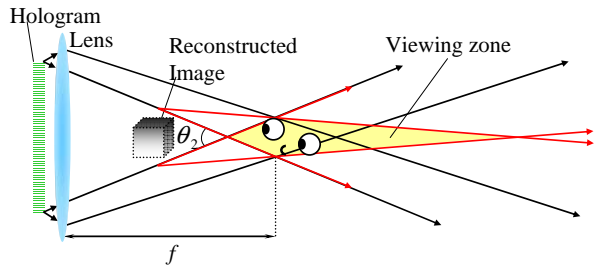


図2 フーリエ変換光学系

位置  $(x_i, y_i, z_i)$  によって変化する値である。文献 [3] では、ホログラム面から  $f/2$  離れた位置を境に、像の位置関係が変わることが示された。今回はこれを見直し、式 (3) で統一的に計算できる式を求めた。 $r_i$  の値の計算方法を、像を再生する位置がホログラム前方 ( $0 \leq z_i$ ) の場合と、ホログラム後方 ( $0 > z_i$ ) の場合とで、切り替えることで、ホログラム後方を含む全ての奥行きでの像の再生が可能となる。

$r_i$  は以下の式で表される。

$$r_i = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + z_i^2} & (0 \leq z_i) \\ \sqrt{\left(\frac{x_i z_c}{z_i} - x\right)^2 + \left(\frac{y_i z_c}{z_i} - y\right)^2 + z_c^2} & (0 > z_i) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、 $z_c$  は、以下の式で与えられるものとする。

$$z_c = \frac{f z_i}{f - 2z_i} \quad (5)$$

以上の式を用いて、仮想物体を構成する各点光源からの複素振幅  $u_i(x, y)$  を計算し、全ての総和を取ることで、干渉縞のデータを作成する。

### 3.2 共役像の除去法

前節で、自由な奥行きでの再生を可能とする CGH の計算法について述べたが、直接像と共役像が重なって見えるという問題が発生する。そこで、いずれかの不要な像の光を除去する必要がある。特殊な光学系を必要としない不要光の除去法として、空間周波数フィルタリングを用いた手法がある [4]。本稿ではこの手法を応用した処理を適用し、不要光を除去する。ある1点の像を再生する場合を考える。図3(a)のように、直接像 P と共役像 Q を結んだ直線から下の領域のホログラムのみを計算することで、直線 PQ よりも上の領域ではホログラム前方の直接像 P のみを観察することができる。また、逆に

<sup>†</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

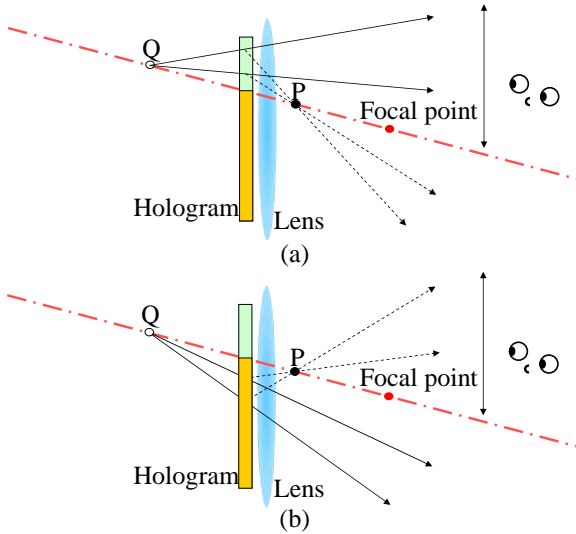


図3 共役像除去: (a) PQより上の領域のみを計算, (b) PQより下の領域のみを計算

表1 実験パラメータ

Pixel pitch	9.5(H)×9.5(V) [ $\mu\text{m}$ ]
Number of pixels	4096×2160 [pixels]
Display size	3.89 × 2.05 [cm]
Wavelength(LED)	632 [nm]
Diameter of lens	100 [mm]
Focal length : $f$	300 [mm]

図3(b)のように、直線PQよりも上の領域のホログラムを計算すると、ホログラム後方の共役像Qのみを、直線PQよりも上の領域で観察できる。このことを利用して、前述のCGH計算法と組み合わせる。像を再生する位置がホログラム前方( $0 \leq z_i$ )の場合は、直線より下側、ホログラム後方( $0 > z_i$ )の場合は、直線よりも上側のみを計算することで、不要な像を除去することが可能となる。

4. 実験結果

提案手法の有効性を確認するため、光学再生実験を行った。表示装置として高精細の反射型LCDを用い、LCDの前にレンズ、レンズの焦点の位置に光源として赤色のLEDを設置することでフーリエ変換光学系を構成した。実験におけるパラメータは表1の通りである。

4.1 実験1 再生位置の検証

仮想物体を再生させる奥行きをホログラムから-30cm~30cmの間で2.5cmずつ変化させた。各再生像の、実際に再生された奥行きと幅を、カメラを用いて実物体と比較することで測定した。2つの測定結果を図4に示す。左の縦軸は実際に再生された奥行き、右の縦軸はその奥行きで再生可能な像の幅を示す。おおそ理想的な奥行きと幅の値が得られており、本手法を用いることで、正しい位置に像を再生できることが確認された。

4.2 実験2 ホログラム面をまたがる像の再生

ホログラムの前方と後方にまたがる物体が再生可能かを検証した。仮想物体として、奥行き方向に20cmおきに離れた「HOLO」の4文字を用いた。図5に本実験における3次元シーンの配置を示す。図6は異なる奥行きにピントを合わせて撮影した写真である。各奥行きで再生像にだけにピントが合っていることから、全ての奥行きの再生像が不要な像が重なることなく同時に観察できることが確認された。

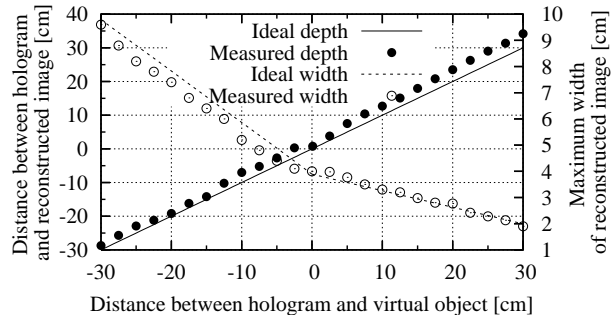


図4 再生位置と再生像の幅

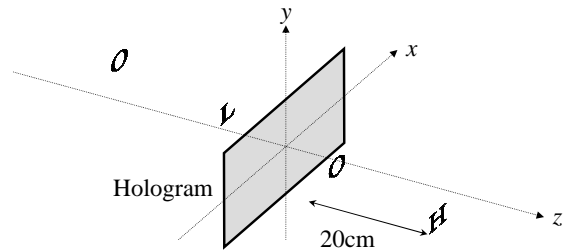


図5 仮想物体の配置

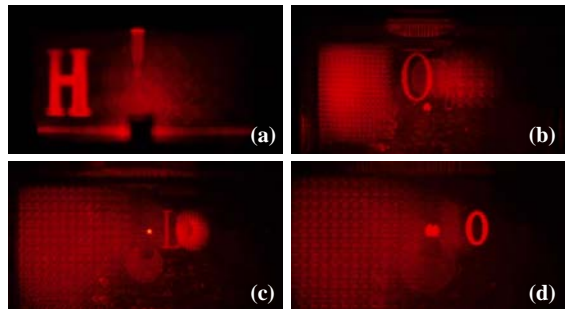


図6 再生像: (a) Hに焦点, (b) 1つ目のOに焦点, (c) Lに焦点, (d) 2つ目のOに焦点

5. まとめ

本稿では、フーリエ変換光学系において、自由な奥行きでの再生を可能とするCGH計算法と共に、再生する奥行きによって観察の邪魔となる、不要な像の除去法も提案した。また、光学再生実験を行い、ホログラム面に対して奥行き-30cmから30cmの範囲に仮想物体を配置可能なことを確かめ、提案法の有効性を確かめた。本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金(課題番号22650015)を用いて行われたものである。

参考文献

- [1] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators", *Opt. Express*, Vol. 16, No. 16, pp. 12372-12386 (2008).
- [2] T. Kurihara, Y. Takaki, "Improvements to 4f imaging system used for hologram reconstruction", in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest, paper DW6 (2011).
- [3] 佐藤裕典, 坂本雄児, "フーリエ変換光学系を用いた計算機合成ホログラムにおける物体表示領域の拡大と共役像の除去", *映像情報メディア学会技術報告*, Vol. 35, No. 9, pp. 29-34(2011).
- [4] 坂本雄児, "空間周波数フィルタリング法による計算機合成ホログラムの共役像除去", *映像情報メディア学会誌*, Vol. 59, No. 4, pp. 588-591(2005).