

計算機合成ホログラムの広視域化

山岸 幹夫・吉川 浩*

日本大学理工学部電子工学科 〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

Enlarging Viewing Area of Computer Generated Holograms

Mikio YAMAGISHI and Hiroshi YOSHIKAWA*

Department of Electronic Engineering, Nihon University, 7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501

Photographic reduction is often used as a simple output facility for the computer generated holograms (CGH). However, its resolution limits the diffraction angle so that viewing angle is not enough for binocular observation. We investigate the use of lens-less Fourier hologram for photographic reduction of the CGH because the viewing angle is proportional to the number of pixels of holograms. Since the hologram is recorded with the point reference source beside the object, it is required for image reconstruction that the point illumination source must be located near the hologram exactly. It is not practical to use such kind of the special illumination. Therefore, we made secondary hologram with collimated reference beam and the object beam from the reconstructed image of the lens-less Fourier type CGH. With this approach, we have obtained the holograms that have wide viewing angle and can be reconstructed with collimated illumination.

1. ま え が き

3次元表示のための計算機合成ホログラム (CGH: computer generated hologram) の出力方法としては、電子ビーム描画装置を用いたものが報告されている¹⁾。しかし、この方法は高価かつ取り扱いが困難という欠点をもつ。これと対照的に安価で簡易な出力方法として写真縮小があるが、解像度が不十分なため両眼で観察するだけの視域 (再生像が観察可能な領域) を得ることは難しい。本研究では、レンズレスフーリエ型ホログラムで視域を拡大することができることに着目した。しかしこのままでは照明光が点光源のレーザー再生ホログラムとなり、実用的ではない。そこで写真縮小により製作したCGHをマスターホログラムとして光学転写を行う。これにより照明光が白色の平行光で、両眼での観察が可能な視域角をもつトランスファーホログラムを製作することができた²⁾。光学転写の方法としては、多重断層型フーリエホログラムでの報告³⁾がある。文献3)では転写により参照光の角度を大きくして0次光を分離することを目的としており、視域の拡大については検討していない。これに対し本論文では、より自然な3次

元像の記録が可能なフレネルホログラムを用い⁴⁾、視域拡大を目的とする点が異なる。

2. 視域拡大の原理

ホログラムを計算するときの参照光が斜め上方からの平行光 (水平面内でオンアキス) の場合、水平方向の視域角 2θ と干渉縞の水平方向における周期 $2d$ の関係は式(1)のように表される。

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \quad (1)$$

ただし、 λ は光の波長である。これより、広い視域角を得るには干渉縞の周期を狭くすればよいことがわかる。干渉縞の周期は記録材料の解像度に依存するため、解像度の低いフィルムによる写真縮小ではホログラム乾板等に比べ視域は狭くなる。

本論文で写真縮小に使用したミニコピーフィルム (富士フィルム社製) の解像度は $2d = 3\mu\text{m}$ ⁵⁾ である。しかし、本論文では使用したカメラレンズの回折限界やホログラムの回折効率を考慮した結果、 $2d = 11.1\mu\text{m}$ として写真縮小を行った。 $\lambda = 633\text{nm}$ のときの視域角は式(1)より、 $2\theta = 3.3^\circ$ となり、500mm離れた所では視域幅が約29mmし

*E-mail: hiroshi@panda.ecs.cst.nihon-u.ac.jp

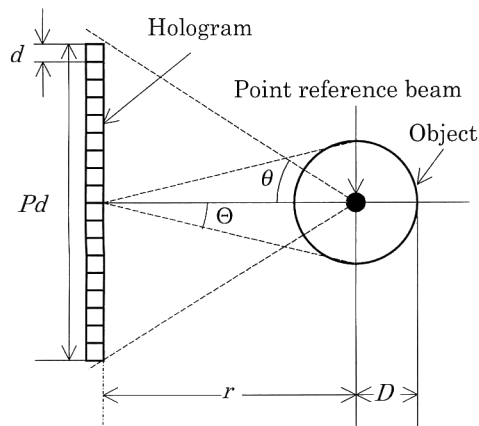


Fig. 1. Top view of optical setup for recording hologram with point reference source. D : Radius of an object area, P : a number of pixels in horizontal, d : pixel pitch, r : distance between hologram and center of object.

かないため、再生像を両眼で観察できない。

そこで、参照光を点光源として物体の上方（水平面内で物体の中心）に置き、レンズレスフーリエ型ホログラムとして視域を広げることを考える。このときの水平面内の視域とホログラムの位置関係を Fig. 1 に示す。以降では簡単に説明するため水平面内の視域についてのみ考える。ただし作成されるホログラムは縦視差ももつ。このときの水平方向の視域角 2θ は、物体の中心から端までの距離を D 、干渉縞の周期を $2d$ 、画素数を P 、物体の中心とホログラム面の距離を r としたとき、式(2)の関係が成り立つ。

$$\tan\theta = \frac{Pd}{2r} \quad (2)$$

また式(1)は θ が小さいときには近似的に式(3)となり、これより式(4)の関係を得る。

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \cong \frac{D}{r} \quad (3)$$

$$2\theta \cong 2 \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \times P}{4D}\right) \quad (4)$$

これより Fig. 1 の光学系では物体の大きさと画素数が視域を左右することがわかる。

ただし、実際にホログラムを再生する場合、平行光源で照明できるほうが便利である。そこで、点光源を参照光とする CGH をマスターホログラムとして光学転写を行うことにより、視域角が広く、平行光で再生可能なホログラムを作製した。

ホログラムの転写の光学系を Fig. 2 に示す。0 次光と実像の分離はレンズを用いて光学的に行った。ここで実像位置にホログラム乾板を置き、参照光を物体光と同じ方向から当てると透過型ホログラムが製作できる。また参照光を逆方向から当てると反射型ホログラムが製作できる。

式(4)より視域は画素数 P に比例する。しかし、CRT

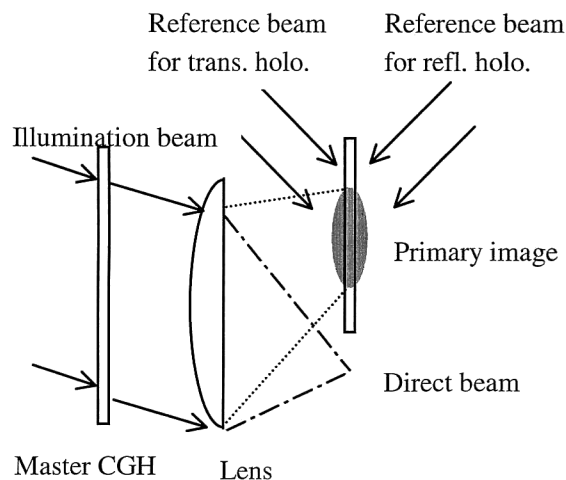


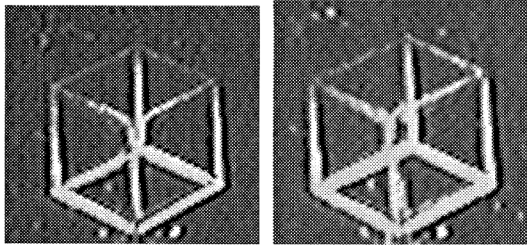
Fig. 2. Side view of optical setup for recording an optical hologram of the reconstructed image from a computer generated hologram (CGH).

(CRT: cathode ray tube) ディスプレイに干渉縞を出力し写真縮小を行う方法では、CRT ディスプレイの画素数による制限を受ける。そこで、CGH を分割してプリンター出力したホログラムを貼り合わせることで画素数を増し、それを写真縮小することによってさらなる視域の拡大を行った。

3. 結 果

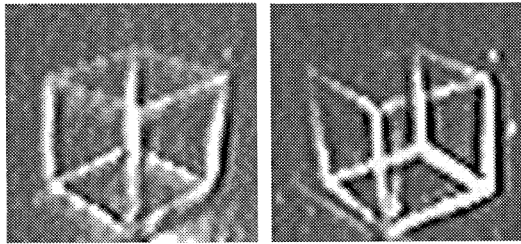
まず CRT ディスプレイ出力 (1,280×1,024 [pixel]) による CGH を写真縮小したものをマスターホログラムとした。なおすべてのマスターホログラムにおいて、垂直方向にオフ軸なレンズレスフーリエホログラムとした。このために、点光源とした参照光と物体中心の位置関係は奥行き・水平方向が同じ位置で、垂直方向は物体と参照光が重ならないようにした。また物体の奥行きは垂直・水平方向の大きさと同程度にした。なお、従来の CGH においては出力装置が 2 値のため、計算結果も 2 値化する必要があった。ミニコピーフィルムはハイコントラストではあるが中間調の記録が可能のため、以下の結果では干渉縞を 8 ビットのグレースケールで出力し写真縮小を行っている。

次にこのマスターホログラムを光学転写することで透過型トランスファーホログラムを製作した。トランスファーホログラムにおいては、すべて照明光を上方 45° の角度から入射させる白色光再生ホログラムとした。また光学転写の際使用したレーザーは He-Ne レーザー (波長: 633 nm) で、トランスファー用乾板には AGFA 社製ホログラム乾板 (8E75HD) を使用した。製作した透過型トランスファーホログラム上の実像の大きさは水平方向 2.8 mm、垂直方向 4.0 mm であった。ホログラムを左右の視点から観察し



(a) (b)

Fig. 3. Reconstructed images of the transmission hologram made from CRT output ($P=1280$ [pixel]). (a) View from left side, (b) view from right side.



(a) (b)

Fig. 4. Reconstructed images of the transmission hologram made from printer output ($P=3200$ [pixel]). (a) View from left side, (b) view from right side.

Table 1. Viewing angles of the transmission hologram for CRT output ($P=1280$ [pixel]) and printer output ($P=3200$ [pixel]).

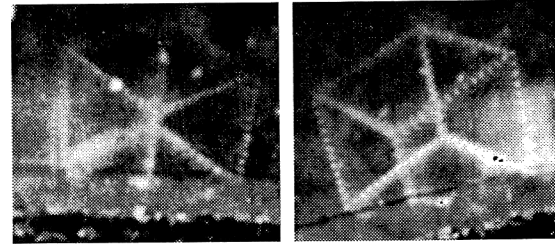
	Display	Printer
Measured (deg.)	8.6	22.6
Theoretical (deg.)	8.3	22.5

たものを Fig. 3 に示す。このトランスファーホログラムの再生像の視域角は約 8.6° と写真縮小されたマスターホログラムを平行光で照明したときの視域角 3.3° に比べ 2.6 倍大きく、再生像を両眼で確認することができた。しかし 500 mm 離れた所では視域幅が 75 mm と平均的両眼間隔 65 mm に対し余裕がないため、視点の移動による運動視差は小さかった。なお、再生像はすべて白色光再生が可能であるが、視域に関しては波長の違いによる影響を避けるため、He-Ne レーザー（波長：633 nm）で測定した。

次にレーザープリンターで出力した CGH を写真縮小したものをマスターとして透過型トランスファーホログラムを製作した。このときの CGH の画素数は $3,200 \times 2,200$ [pixel] で、ディスプレイ出力の横 2.5 倍、縦 2.15 倍となっている。なお、レーザープリンターは 2 値で出力されるので、8 ビットで計算された CGH にディザを用いることで疑似階調を出力し、ホログラム再生時のゴースト像を抑えた。製作したトランスファーホログラム上の実像の大

Table 2. Viewing area (500 mm from hologram) of the transmission hologram for CRT output ($P=1280$ [pixel]) and printer output ($P=3200$ [pixel]).

	Display	Printer
Measured (mm)	75	200
Theoretical (mm)	73	199



(a) (b)

Fig. 5. Reconstructed images of the reflection hologram made from printer output ($P=3200$ [pixel]). (a) View from left side, (b) view from right side.

Table 3. Viewing angles of the reflection hologram for CRT output ($P=1280$ [pixel]) and printer output ($P=3200$ [pixel]).

	Display	Printer
Measured (deg.)	9.5	18.9
Theoretical (deg.)	9.3	19.4

きさは水平方向 2.6 mm、垂直方向 3.2 mm であった。白色光で照明したホログラムを左右の視点から観察したものを Fig. 4 に示す。このときの視域角は 22.6° となり、500 mm 離れた所では視域幅 200 mm と両眼間隔に対して十分余裕をもつため、視点の移動による運動視差がはっきりと認識された。

Table 1 に各出力における水平方向の視域角の測定値とその理論値を示す。理論値は式(4)において $\lambda=633$ nm として求めた。この結果から CRT ディスプレイ出力に比べプリンター出力のほうが 2.6 倍広いことがわかる。マスターホログラムの画素数の比 2.5 倍と異なるのは、光学転写時のレンズの位置等が異なったためと考えられる。また、理論値と測定値がよく一致していることもわかる。Table 2 に 500 mm 離れたところでの各状態の観察領域を示す。プリンター出力によるホログラムの視域幅 200 mm は、2 章で述べた平行光を参照光とする CGH の視域幅 29 mm の 6.9 倍となった。

反射型でも同様にトランスファーホログラムを製作した。このホログラムは、写真縮小では出力する方法のなかったリップマンホログラムである。リップマンホログラムでは白色照明すると特定の波長のみ反射されるため、透過

型に比べてはっきりと再生像を認識できた。ホログラムを左右の視点から観察したものを Fig. 5 に示す。

Table 3 に反射型ホログラムでの各出力における水平方向の視域角の測定値とその理論値を示す。ただし、ホログラム上の実像の大きさは CRT ディスプレイ出力時が水平方向 2.5 mm, 垂直方向 3.0 mm, プリンター出力時が水平方向 3.0 mm, 垂直方向 3.5 mm であった。この結果をみると透過型と同じく理論値と測定値はよく一致していることがわかる。反射型の視域角 18.9° は 500 mm 離れた所では観察領域 166 mm と透過型より狭かったが、視点の移動により運動視差を認識するには十分な大きさだった。なお、透過型と反射型の視域の違いは転写時におけるマスターホログラムの位置の違いから生じたもので、原理的なものではない。

4. む す び

写真縮小による CGH をマスターホログラムとして光学転写を行うことにより視域角を拡大できることを示した。この方法では視域角が CGH の画素数に比例する。そこで

写真縮小の入力として CRT ディスプレイの代わりにプリンター出力を用いて画素数を増加させ、視域角 22.6° を得た。これにより両眼視差のみでなく視点の移動による運動視差がはっきりと認識できた。

今後は実写やサーフェイスモデルのような複雑な物体を用いたホログラムの製作および計算機合成レインボーホログラムの視域拡大を行う予定である。

文 献

- 1) 浜野智恒, 吉川 浩: “電子線描画による 3 次元物体の計算機合成ホログラムの作製”, テレビジョン学会誌, **50** (1996) 1607-1611.
- 2) 山岸幹夫, 福島啓介, 吉川 浩: “計算機合成ホログラムの光学転写による広視域化”, Optics Japan '97 講演予稿集 (1997) pp. 223-224.
- 3) S. Wentzel, A. Jendral, R. Brauer and O. Bryngdahl: “Increase of the space-bandwidth product of computer-generated near-field holograms by optical means,” Opt. Lett., **19** (1994) 1352-1354.
- 4) 吉川 浩: “超音波光変調器を用いた計算機ホログラムの像再生”, O PLUS E, **204** (1996) 90-94.
- 5) 大越孝敬: ホログラフィー, 初版 (コロナ社, 1977) p. 68.