

計算機合成レインボーホログラムの視域拡大

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

Viewing Area Enlarged Computer Generated Rainbow Holograms

Mikio YAMAGISHI* and Hiroshi YOSHIKAWA*

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

We have reported that viewing area of computer generated holograms (CGH) can be expanded with lensless Fourier hologram configuration. Since the CGH has full parallax, computational is time consuming and chromatic aberration causes blur in the reconstructed images. In this report, we apply the rainbow hologram approach to reduce computational time and chromatic aberration of the enlarged viewing area CGH. In the experimental result, computational time becomes 20 times faster than the previous CGH, and reconstructed image becomes sharper and brighter.

1. ま え が き

ホログラムは、物体からの波面を完全に記録・再生することが可能である。このホログラムを自動的に出力する方法として、ホログラフィックステレオグラムプリンター¹⁾が発表されている。しかし、ホログラフィックステレオグラムでは視差を離散化するため、完全な波面再生はできない。そこで、筆者らは計算機合成ホログラム²⁾ (CGH: computer generated hologram) を用いた完全な波面再生ができるプリンターを製作することを考えた。

CGHの出力方法のひとつとして、電子ビームを用いたもの³⁾がある。この方法は高い解像度が得られる反面、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を得ることは難しい。

筆者らは写真縮小によるホログラムから両眼で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した⁴⁾。これはレンズレスフーリエ型CGH⁵⁾をマスターホログラムとする光学転写により製作される。このCGHはフルパララックスではあるが、計算に時間がかかり、透過型ではイメージ型となるため色収差が発生する。本論文ではレインボーホログラム⁶⁾の特性を生かし、マスターホログラムを計算機合成レインボーホログラム (CGRH: compu-

ter generated rainbow hologram) とすることで計算時間と色収差を改善した⁷⁾。なお、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⁸⁾がある。ただし、文献8)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。

2. 視域拡大の原理

ホログラムを計算するとき、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、水平方向の回折角 θ 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。ただし λ は光の波長とする。

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

なお、参照光が平行光・オンアキスの場合、ホログラムの視野角と視域角は回折角の2倍と等しくなる。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。しかし、干渉縞の周期は記録材料の解像度に依存するため、写真フィルムによる写真縮小ではホログラム乾板等 비해視域は狭くなる。筆者らはすでに参照光を点光源 (水平面内でオンアキス) とするレンズレスフーリエ型ホログラムにすることで視域を拡大する方法を示した⁴⁾。このときの水平方向の視域角 2θ は、記録する物体の中心から水平方向の端までの距離を D 、ホログラムの水平方向の画素数を P 、光の波長を λ 、物体の中心とホログ

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

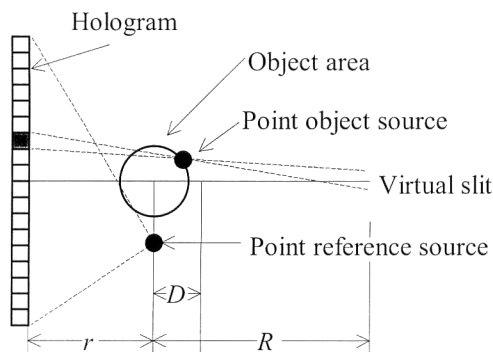


Fig. 1. Side view of optical setup for recording hologram with point reference source. r : Distance between hologram and center of object. R : Distance between center of object and virtual slit. D : Radius of an object area.

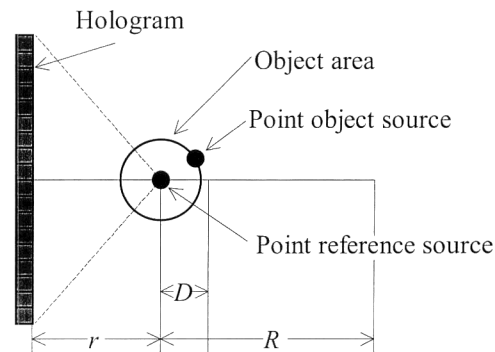


Fig. 2. Top view of optical setup for recording hologram with point reference source. r : Distance between hologram and center of object. R : Distance between center of object and virtual slit. D : Radius of an object area.

ラム面の距離を r としたとき、式 (2) で表わされる。ただし式 (2) は式 (1) において θ が小さいとき、近似を用いることで得られる⁴⁾。

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

これよりレンズレスフーリエ型ホログラムでは、視域角 2θ は周期 $2d$ によらず、記録する物体の大きさとホログラムの画素数に依存することがわかる。そのため、写真フィルムの解像度による制限を受けず、回折角よりも視域角を大きくすることができる。

3. CGRH の計算方法

文献 4) の CGH はフルパララックスのため計算に時間がかかり、透過型ではイメージ型となるため色収差が発生する。そこで、レインボー型とすることでこれらの問題を解決することを検討した。

CGH の計算を行うとき、3次元物体は点光源の集合体と仮定する²⁾。そして、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、干渉縞を計算する。この構成はレンズレスフーリエ型ホログラム⁵⁾と呼ばれるが、実際には物体光一点一点と参照光の干渉縞を求めるフレネルホログラムの計算を行い、結果は256階調で表現する干渉縞データとする。

Fig. 1 および Fig. 2 に本論文で提案する CGRH 計算時の垂直面内での仮想スリット、ホログラムおよび各点光源の位置関係を示す。なお Fig. 1, Fig. 2 に示されている r は物体と CGRH との距離を、また R は仮想スリットと物体との距離を示す。

本論文ではマスターホログラムを計算するとき、従来の CGH⁴⁾ に縦方向視差を棄却するための仮想スリットを置くことでレインボー化を行う⁹⁾。仮想スリットの役割は、ホ

ログラム上での各点光源からの光の計算範囲を、仮想スリットを通過する光のみに制限することである。これにより、スリットによる回折以外は光学的レインボーホログラムを忠実に再現することができる。同時に、計算範囲が制限されるため計算時間を短縮することにもなる。このとき、通常の2段階レインボーホログラムの光学系では、マスターホログラム上にスリットを置き、スリット位置が観察位置となるため、両眼の幅よりも広いホログラムを必要とする。これに対して Fig. 1 の光学系を用いると、マスターホログラムが小さくてすむ。同時にレンズレスフーリエ型なので、物体とマスターホログラムの距離が近いほど視域が広がるという利点もいさせる。

なお、仮想スリットの幅は大きすぎると色収差が発生し、小さすぎると回折によるぼけが発生するので、両者の影響が比較的少ない 5 mm に設定した。

4. 光学転写の方法

式 (2) および Fig. 1 からわかるとおり、視域角 2θ は距離 r が小さいほど広がる。このため、参照光を点光源とし、ホログラムに近づける必要があった。するとホログラム再生時には、距離 r の位置に点光源の照明光を用意しなくてはならない。しかし、実際にホログラムを再生する場合、平行光で照明できるほうが実用的である。そこで、点光源を参照光とする CGRH をマスターホログラムとし、光学転写によって、参照光を平行光とするトランスファーホログラムを製作した。これにより平行光で再生可能な視域角の広いホログラムを製作した。

ホログラムの転写の光学系を Fig. 3 に示す。垂直面内ではオフアクシスホログラムとなっているので、0次光と実像の分離は容易である。ここで実像位置にホログラム乾板を置き、斜め上方より参照光を当てることでトランス

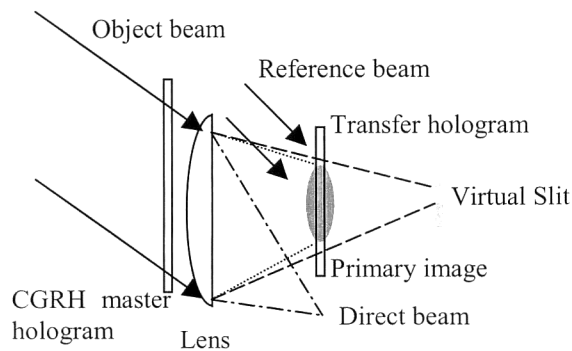
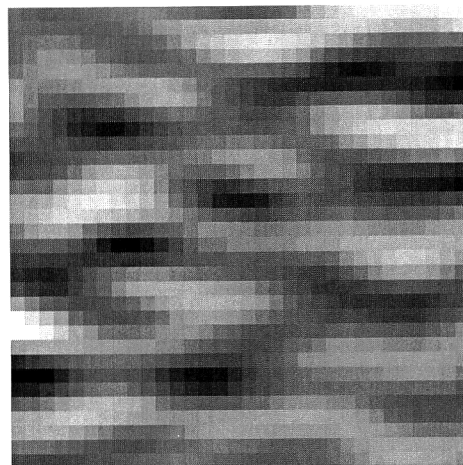


Fig. 3. Optical setup for recoding an optical hologram of the reconstructed image from the computer generated rainbow hologram (CGRH).

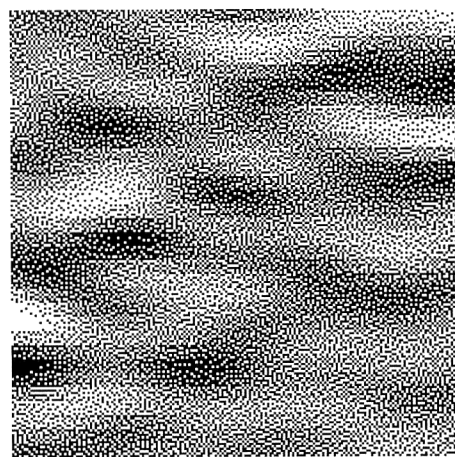
ファーホログラムを製作する。なおレンズの焦点距離は、CGRH 計算時の参照光とマスターホログラムとの距離と同じ距離にした。

5. 結 果

まず画素数 4800 pixel×3300 pixel の CGRH をレーザープリンターに出力した。撮影に使用したミニコピーフィルム（富士フィルム社製）はグレースケールでの記録が可能である。しかし、プリンターは 2 値で出力されるため、256 階調のグレースケールで表現されている干渉縞データを何らかの方法で 2 値化する必要がある。そこで誤差拡散法による擬似階調表現を行った。このとき、100 dpi の 256 階調で表現されている干渉縞データの 1 画素を 6×6 ドットで表現し、600 dpi の 2 値に変換して出力した。なお、誤差拡散法の選択は、画像処理ソフト（Adobe Photoshop）にあるアルゴリズムの中で、ホログラム再生時に高次回折像が最も抑えられるものを採用した。このため、ミニコピーフィルムに撮影された干渉縞データは、元の階調に近いものであると考えられる。256 階調で表現されている干渉縞と誤差拡散後の干渉縞を Fig. 4 に示した。また、使用したレーザープリンターは A3 用紙まで出力できるが、ピクセルピッチが 100 dpi のとき、A3 用紙では画素数が 1600 pixel×1100 pixel までしか出力できない。このため、今回は A3 用紙を 9 枚繋げることで画素数を 4800 pixel×3300 pixel まで増加させた。この出力をミニコピーフィルムに写真縮小し、それをマスターホログラムとした。このマスターホログラムの大きさは 32 mm×20 mm であった。次にそのマスターホログラムを用いて光学転写によりトランスファーホログラム（cube：点光源数 185）を製作した。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。このとき仮想スリットは物体中心



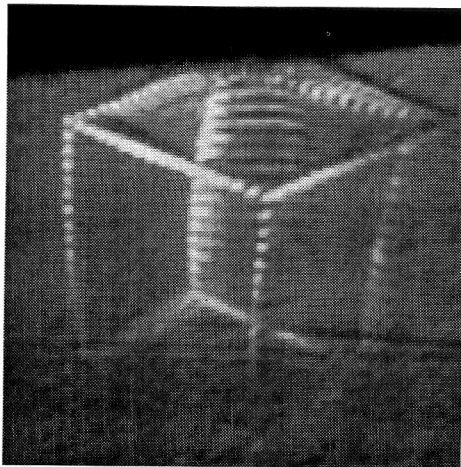
(a)



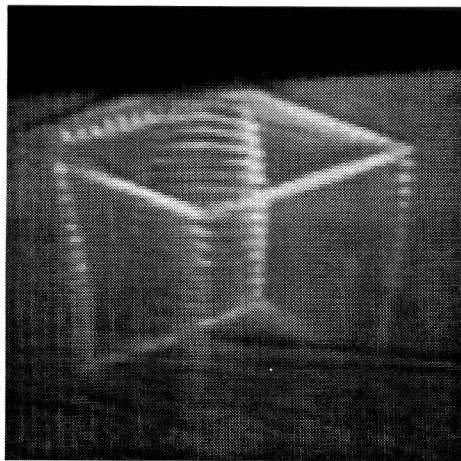
(b)

Fig. 4. Part of a calculated hologram. (a) 256 gray levels. (b) Binarized with error diffusion method.

から 500 mm、物体を CGRH の表面から 120 mm 離れた場所に置き、転写時のレーザーの波長を 633 nm、参照光の入射角度を 45° とした。またレンズの焦点距離は CGRH 計算時の参照光とマスターホログラムとの距離と同じ 120 mm のものを用いた。製作したトランスファーホログラムの大きさは水平方向 3.5 mm、垂直方向 5.0 mm であった。ホログラムから 500 mm 離れ、正面から左右 115 mm の場所で CCD カメラにより観察した再生像を Fig. 5 に示す。使用した CCD カメラは絞り値 $F=11$ 、焦点距離 $f=50$ mm であった。このため、レンズの瞳の大きさは約 $D=4.5$ mm と人間の瞳の大きさとほぼ等しくなった。このときの照明光の条件は平行光・白色光源とし、照明光の角度をホログラムの上方 45° とした。このホログラムの視域角は 26° と非常に大きく、参照光を平行光として製作した従来の CGRH の視域角 3.3° に比べ、約 7.9 倍であった。視域角

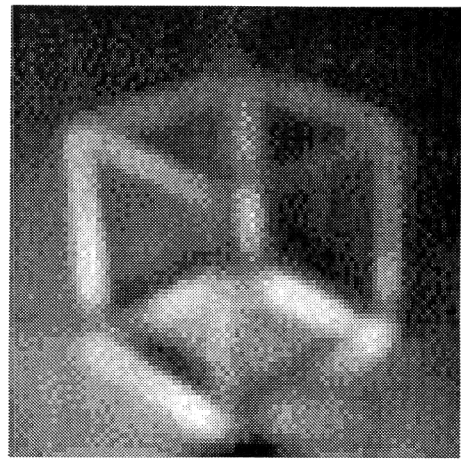


(a)

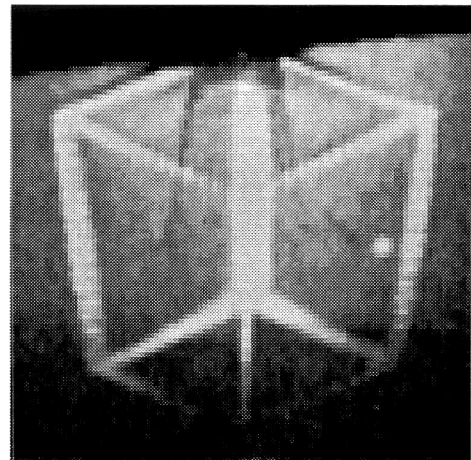


(b)

Fig. 5. Reconstructed images (cube) from the proposed rainbow hologram. (a) View from left side. (b) View from right side.



(a)



(b)

Fig. 6. Comparison of reconstructed images (cube). (a) Made from CGH master. (b) Made from CGRH master.

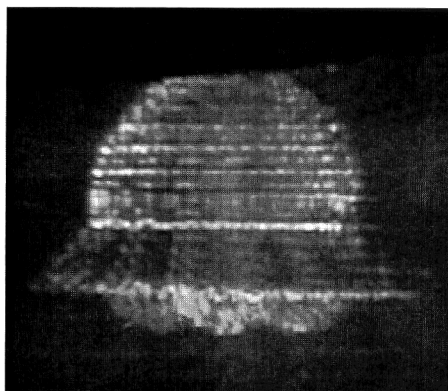


Fig. 7. Reconstructed image (UFO) from proposed rainbow hologram.

26° は 500 mm 離れた所では観察領域幅 230 mm に相当し、平均両眼間隔 65 mm に対して十分余裕をもつため、視点移動による運動視差がはっきりと認識された。同時に、式(2)で $\lambda = 633 \text{ nm}$ としたときの水平方向における視域角の理論値 25° と測定値はよく一致していることがわかる。Fig. 6 に従来の方法⁴⁾で製作した物体と今回の物体を Fig. 5 と同じ条件で正面から撮影したものを示す。これを見てもわかるように、従来の CGH⁴⁾より今回製作したほうが明るく、一点一点ははっきり見えるのがわかる。像が明るくなったのは、マスタープログラムがレインボー型なのでスリットに光が集光するためである。また、点のはっきり見えたのは、レインボー型としたことで色収差が抑えら

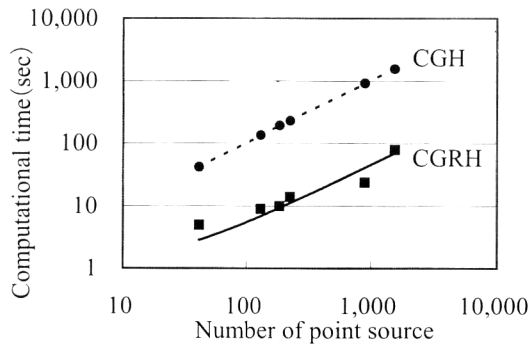


Fig. 8. Comparison of computational speed between full parallax CGH and CGRH.

れたためと考えられるが、定量的な評価はまだ行っていない。

同様に画素数 3200 pixel×2200 pixel の点光源数の多い複雑な物体をマスターホログラムとして、トランスファーホログラム (UFO: 点光源数 1,526) を製作した。ホログラムを Fig. 5 と同じ条件で正面から観察したものを Fig. 7 に示す。

Fig. 8 にフルパララックスの CGH と本論文で提案した CGRH (仮想スリット幅 5 mm) の点光源数による計算時間の違いを示す。このときの条件としては、どちらも同じ Pentium-II 400 MHz のコンピューターを用い、ホログラムのサイズを 1600 pixel×1100 pixel としたときのものである。CGRH の計算速度は、縦方向の視差を犠牲にしたことにより、従来の CGH⁴⁾ の計算速度より約 20 倍高速となった。具体例として、Fig. 7 の UFO を計算するのに従来の CGH⁴⁾ では 6,300 秒かかっていたものが、今回の CGRH

ではスリット幅が 5 mm のとき 316 秒で計算することができた。

6. む す び

CGH をレインボーホログラムとすることで縦視差を計算しない分だけ計算時間が抑えられ、今まで製作するのが困難であった点光源数の多い複雑な物体を用いたホログラムの製作が容易になった。また、ぼけの少ない明るい像が得られた。

文 献

- 1) M. Yamaguchi, N. Ohya and T. Honda: "Holographic three-dimensional printer: New method," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 217-222.
- 2) J. P. Waters: "Holographic image synthesis utilizing theoretical method," *Appl. Phys. Lett.*, **9** (1966) 405-407.
- 3) 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.
- 4) 山岸幹夫, 吉川 浩: "計算機合成ホログラムの広視域化", *光学*, **27** (1998) 535-538.
- 5) G. W. Stroke: "Lensless Fourier-transform method for optical holography," *Appl. Phys. Lett.*, **6** (1965) 201-203.
- 6) S. A. Benton: "Hologram reconstruction with extended incoherent sources," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 1545A.
- 7) 山岸幹夫, 吉川 浩: "計算機合成レインボウホログラムの広視域化", *Optics Japan '98 講演予稿集* (1998) pp. 127-128.
- 8) 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.
- 9) T. Hamano and H. Yoshikawa: "Image-type CGH by means of e-beam printing," *SPIE Proc. Pract. Hologr. XII*, **3293** (1998) 2-14.