



ホログラフィック・ステレオグラムによる 像再生特性に関する考察

山口 雅浩・本田 捷夫*・大山 永昭

東京工業大学工学部像情報工学研究施設 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1993年6月10日受付, 1993年8月30日受理)

Imaging Characteristics of Holographic Stereograms

Masahiro YAMAGUCHI, Toshio HONDA and Nagaaki OHYAMA

Tokyo Institute of Technology, Imaging Science and Engineering Laboratory,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received June 10, 1993; Accepted August 30, 1993)

The properties of wavefront reconstruction of holographic stereograms are analysed, and compared with those of actual holograms. The phase component recorded in holographic stereogram is only the information of directions of light rays, while quadratic phase information is recorded in Fresnel hologram. A phase added stereogram (PAS), which is an intermediate medium between a hologram and a holographic stereogram, is considered, so that difference of imaging characteristics are mathematically revealed. Experimental results confirm the theoretical descriptions.

1. はじめに

今日, さまざまな分野で3次元の画像情報が用いられており, その表示方法に関する研究が盛んに行われている。なかでもホログラフィは3次元画像を自然な立体像として表示できる手法として, 3次元画像生成, 処理, 通信等の分野への応用が考えられている。ホログラフィック・3-Dプリンタ¹⁾は立体表示可能なハードコピーを出力する装置であり, 上記のようなシステムの端末装置として開発が行われている。また, ホログラフィをインタラクティブまたはリアルタイム表示することに関する研究も活発化している²⁾。コンパクトで簡便な装置としてホログラフィックな表示メディアが実現されれば, 今後さらに発展すると考えられる3次元画像処理の分野での有用性は高いと考えられる。

ホログラフィック・ステレオグラム³⁾は物体をあらゆる角度から撮影した2次元画像から合成され, ホログラ

ムとして立体像を表示できるものであり, 上記のような目的に適した方法である。コンピュータグラフィックスの手法等により作成した2次元投影像を空間光変調素子を用いてホログラムに露光することによって自動的に合成でき, 計算機の3次元データから自動的にホログラムを合成する手法として有望である。

従来, ホログラフィック・ステレオグラムにおいては多眼視ステレオ写真と同様両眼視差や動的視差によって立体認識されるといわれている。しかし, 例えば3-Dプリンタのために開発したマルチドット記録法^{1,4)}を用いて合成されたホログラフィック・ステレオグラムは, 視差方向に関するサンプリングを十分細かくすることができる。この場合には両眼視差, 輻輳のみではなく焦点調節の要因によっても立体認識されると考えられ, 立体知覚の要因に関しては真のホログラムと変わらない。そこで本研究は, ホログラフィック・ステレオグラムとホログラムの本質的な相違を明確にすることを目的として, ホログラフィック・ステレオグラムによる波面再生特性に関して考察する。

これまで, ホログラフィック・ステレオグラムの像再生に関しては研究されているが⁵⁻⁹⁾, 像の歪みの問題や

* 現在: 千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Present address: Department of Image Science,
Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33,
Yayoi, Inage-ku, Chiba 263

視差方向のサンプリングが粗いことに起因する問題点が中心である。上下左右方向に十分細かく視差情報を記録した場合にはそのような問題は起こらない。ここではコヒーレント光照明の下で、ホログラフィック・ステレオグラムによる再生像について定式化を行い、回折による像の劣化と合成光学系の関係について述べる。次に両者による再生波面の持つ位相情報に関してホログラム面直後において比較を行う。そして両者の中間的な性質を持つ PAS (phase added stereogram)¹⁰⁾を考えることによってこれらの像再生特性の相違を明らかにする。またホログラム、ホログラフィック・ステレオグラム、PASを実験的に作成し、これを実験的に検証したので報告する。

2. マルチドット記録によるホログラフィック・ステレオグラム

ホログラフィック・ステレオグラムとしてはさまざまな記録方式が提案されているが、基本的にはほぼ同じ原理に基づいている。ここでは 3-D プリンタのために開発したマルチドット方式と名付けた手法について検討する。マルチドット法は、上下左右の視差情報を自動的に記録することが可能で、完全に歪のない立体像を表示することができる。特に、拡散板を用いないためスペckルノイズ等が発生しない点と、視差方向のサンプリングピッチを非常に細かくすることで自然な立体像を表示できるという点で、ホログラムとの本質的な比較が容易である。

マルチドット方式によるホログラフィック・ステレオグラムの合成光学系を Fig. 1 に示す。液晶パネルに表示した 2 次元画像を透過したレーザー光をホログラム面に集光し、参照光との干渉縞をホログラムとして記録す

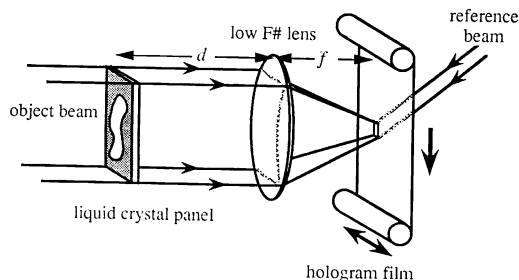


Fig. 1 Optical setup for multidot recording of holographic stereogram. f and d are the focal distance of the lens and the distance from the liquid crystal panel to the lens, respectively.

る。3-D プリンタに用いる場合は白色光照明下で上下左右方向の視差情報を表示するため、参照光を物体光とは逆方向から入射することでリップマンホログラムを記録する。参照光を物体光と同一方向から入射して記録する場合には透過型ホログラムになるため、上下・左右の視差情報を表示するためにはレーザー光再生する必要がある。ホログラム合成においては感材を上下左右に移動し、点状の要素ホログラムによってホログラム面を塗りつぶすように露光する。液晶パネルに表示する画像によってホログラム面を通過するすべての方向に向かう光線の強度を独立に変調することができるため、コンピュータグラフィックスの手法を用いて計算した画像から立体像を合成できる。

本論文では、コヒーレント光照明の下でこのマルチドット方式によるホログラフィック・ステレオグラムと真のホログラムによる再生波面について検討し、その像再生の特性の比較を行う。ここではホログラム面および視差方向に対するサンプリングは十分細かいものとし、サンプリングによる影響については考慮しない。なお、ホログラフィック・ステレオグラムでは要素に分割して記録するため、要素ホログラムの多重露光による劣化を避けようとするとき視差方向の角度分解能に限界がある¹¹⁾が、ここではその影響については割愛する。また、ホログラフィック・ステレオグラムにおいて露光する 2 次元画像はホログラムの撮影の際のレーザー光照明と同じ条件で作成され、S/N やコントラストに関してはその差はないものとする。そして両者の露光の際には感材の特性等による劣化はなく、記録された物体光が完全に再生されるものとする。

3. 像再生の定式化

まず、ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生について定式化を行い、再生像の性質に関して考察する。マルチドット記録方式によるホログラフィック・ステレオグラムの記録および像再生のプロセスは、原画作成、フーリエ変換ホログラムの記録、ホログラム面から像面までの回折、の三つのステップに分けて考えることができる。ここでは順を追って各プロセスについて定式化する。

原画の作成は通常のコンピュータグラフィックスと同様の手法により行われる。ここでは隠面消去や面の拡散特性等の効果については考えず、多数の点光源からなる物体 $g(x, y, z)$ を記録する。ホログラム面上の点 (x_i, y_i) に j 番目の要素ホログラムとして露光する画像 $f_i(\xi_i,$

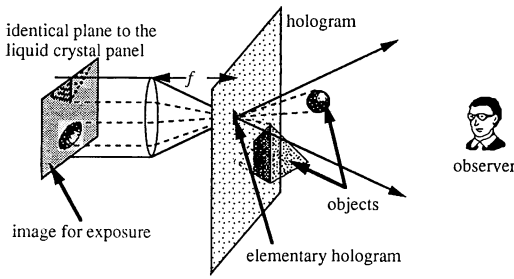


Fig. 2 Geometry for calculation, recording and reconstruction of multidot holographic stereogram.

η_j は, (x_j, y_j) を中心とする中心投影により作成される (Fig. 2). 手前の物体が伝搬してきた光を遮らないものとする, (1)式を用いて $f_j(\xi_j, \eta_j)$ を計算することができる.

$$f_j(\xi_j, \eta_j) = \int g\left(-\frac{z}{f}\xi_j + x_j, -\frac{z}{f}\eta_j + y_j, z\right) dz \quad (1)$$

ここで f は合成に用いるレンズの焦点距離で, これは像を観察できる視域の角度を決めるものである. またホログラムは z 軸に垂直に置かれ, 簡単のため $z=0$ であるものとした.

(1)式に従って作成された画像は, Fig. 1の合成光学系によりフーリエ変換ホログラムとしてホログラム面上の各点に露光される. したがってホログラム面上における物体光の複素振幅分布 $p_j(u_j, v_j)$ は,

$$p_j(u_j, v_j) = \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda f}\left(1 - \frac{d}{f}\right)(u_j^2 + v_j^2)\right\} \cdot \iint f_j(\xi_j, \eta_j) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi_j u_j + \eta_j v_j)\right\} d\xi_j d\eta_j \quad (2)$$

ただし (u_j, v_j) は,

$$u_j = x_h - x_j, \quad v_j = y_h - y_j \quad (3)$$

であり, (x_h, y_h) はホログラム面上における絶対座標, λ は記録したレーザー光の波長, また d は合成光学系における原画像を表示した液晶パネルとレンズ間の距離である. ここでは理想的な場合を考え, 記録した物体光が完全に再生されるものとする, j 番目の要素ホログラムからの再生波面は, ホログラム面直後において(2)式で表される.

このホログラムからの再生像 $\hat{g}(x, y, z)$ は, フレネル回折の仮定の下で, すべての要素ホログラムについて和をとることにより,

$$\hat{g}(x, y, z) = \sum_j \iint \left[g\left\{x - \left(\frac{z'}{z} - 1\right)x_j, y - \left(\frac{z'}{z} - 1\right)y_j, z'\right\}\right]^* \cdot \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda z} \left\{ \left(x - \left(\frac{z'}{z} - 1\right)x_j\right)^2 + \left(y - \left(\frac{z'}{z} - 1\right)y_j\right)^2 \right\}\right\} dz' \cdot \frac{\exp(j2\pi z/\lambda)}{j\lambda z} \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda z} \left\{ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right\}\right\} \quad (4)$$

となる. *はコンボリューションを表す.

ここでホログラフィック・ステレオグラムに記録する物体が $z=z_0$ にある2次元画像の場合について考える. $g(x, y, z)$ が2次元物体 $g_{z_0}(x, y)$ のとき, $z=z_0$ における再生光の複素振幅分布は(4)式から

$$\hat{g}(x, y, z) = g_{z_0}(x, y) * \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda t}(x^2 + y^2)\right\} \cdot \frac{\exp(j2\pi z_0/\lambda)}{j\lambda z_0} \sum_j \left[\exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda z_0} \left\{ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right\}\right\} \right] \quad (5)$$

となる. なお,

$$t = z_0^2 \left[\frac{1}{f} \left(1 - \frac{d}{f}\right) + \frac{1}{z_0} \right] \quad (6)$$

である. ホログラムが十分大きく要素ホログラムのピッチが細かければ, (5)式の \sum の後の項の影響は小さい. このとき, ホログラフィック・ステレオグラムからの再生像は2次元物体のフレネル回折パターンと見なすことができ, そのフレネル回折の距離は t である. したがって t が大きいと回折による像の劣化が生じる. Fig. 3に物体からホログラム面までの距離 z_0 と t の関係を示す. $d \neq f$ のとき $t=0$ となるのはホログラム面と原画の結像面であり, $d=f$ のときはホログラム面のみである. このように, ホログラム面や原画の結像面に近い位置に

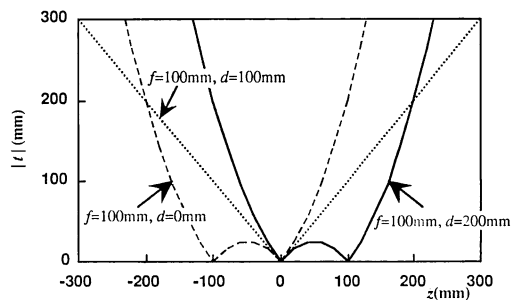


Fig. 3 Relationship between the distance of equivalent Fresnel diffraction (t) and the distance from the hologram plane to the reconstructed object (z_0). The cases of $d=0$ mm (dashed line), 100 mm (dotted line), and 200 mm (solid line) are shown, where $f=100$ mm.

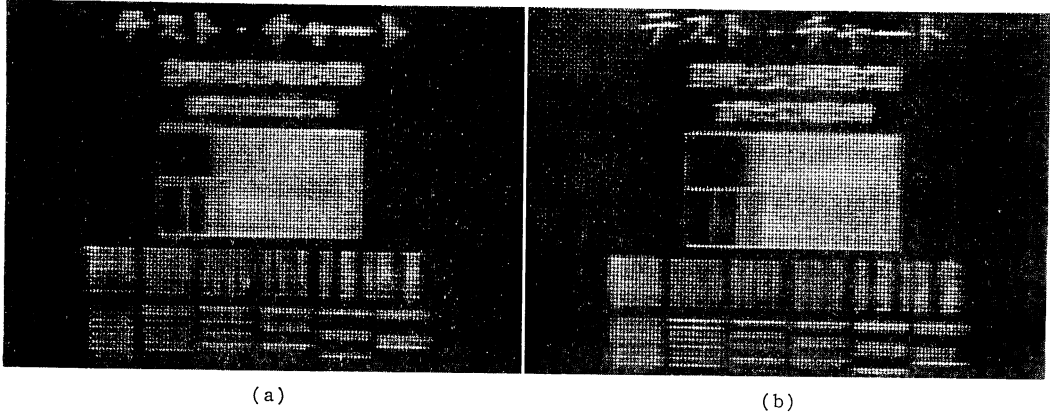


Fig. 4 Reconstructed test chart image recorded in the holographic stereograms. The real image is located 65 mm apart from the hologram plane. In the recording optics, the image of liquid crystal panel is located (a) near and (b) far from the hologram plane.

像を再生する場合は回折による劣化はほとんどないが、その面から離れるほど回折の影響により像は劣化する。

例えば円筒型マルチプレックス・ホログラム^{9,12)}の場合、原画は通常円筒の中央に対応する位置に結像される。そして再生される立体像はほぼ円筒(ホログラム面)とその中心(原画の結像位置)との間に再生されるので、Fig. 3のグラフにおいて比較的 t が小さく、回折の影響が抑制される条件が満たされている。

平面型のホログラフィック・ステレオグラムにおいては、多くの場合ホログラム面の前後に像が再生される。したがってホログラム面前後で平均的に t が小さくなるように光学系を設定すればよく、Fig. 3 から $d=f$ とするのが妥当と考えられる。なお、このとき原画は無遠に結像される。

以上の解析を確認するため簡単な実験を行った。原画をホログラム面近傍に結像させた光学系 ($d \gg f$) と、無限遠に結像させた光学系 ($d=f$) により、ホログラム面の手前 65 mm の位置に 2次元のテストチャートを再生するホログラフィック・ステレオグラムを作成した (Fig. 4)。ホログラフィック・ステレオグラムは Fig. 1 に示す合成光学系を用いてリップマン型ホログラムとして合成し、再生には白色光を用いている。ホログラム面近傍に原画を結像させた光学系によるホログラフィック・ステレオグラムにおいては、その再生像のボケが無遠に原画を結像させた系によるホログラフィック・ステレオグラムよりも大きい。これは前述のように回折の影響がより大きく再生像に寄与するためと考えられる。

4. 再生波面の比較

次に、ホログラムとホログラフィック・ステレオグラ

ムの再生特性を比較するため、ホログラム面直後の再生波面の定式化を行う。フレネル回折を仮定すると、3次元物体 $g(x, y, z)$ のホログラムにおけるホログラム面上での強度分布 $I_h(x_h, y_h)$ は、

$$I_h(x_h, y_h) = \left| R - \iiint g(x, y, z) \frac{\exp(-j2\pi z/\lambda)}{j\lambda z} \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z} \{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2\} \right] dx dy dz \right|^2 \quad (7)$$

となる。ここで R は参照光の複素振幅を表す。このホログラムの再生光のうち一次回折光のみについて注目すると、その再生波面 $U_h(x_h, y_h)$ はホログラム面直後において

$$U_h(x_h, y_h) = \iiint g(x, y, z) \frac{\exp(-j2\pi z/\lambda)}{j\lambda z} \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z} \{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2\} \right] dx dy dz \quad (8)$$

となる。

一方ホログラフィック・ステレオグラムにおいては、イメージ型ホログラムにおいて妥当と考えられる $d=f$ の条件を(4)式に代入することにより

$$U_{h,i}(x_h, y_h) = \iiint g(x_i + \Delta x_0, y_i + \Delta y_0, z) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda z} \{\Delta x_0(x_h - x_i) + \Delta y_0(y_h - y_i)\} \right] \cdot d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \quad (9)$$

で表される波面が再生される。ここで $\Delta x_0, \Delta y_0$ は $\Delta x_0 = x - x_i, \Delta y_0 = y - y_i$ である。

ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムを比

較するため、ここでホログラム面上のある一点 (x_i, y_i) の周りの微小領域に着目する。

$$\Delta x_h = x_h - x_i, \quad \Delta y_h = y_h - y_i \quad (11)$$

さらに

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \Delta x_h^2 + \Delta y_h^2 \\ \phi_2 &= -2(\Delta x_0 \Delta x_h + \Delta y_0 \Delta y_h) \\ \phi_3 &= \Delta x_h^3 + \Delta y_h^3 \end{aligned} \quad (12)$$

とすると、(8)、(9)式は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} U_h(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) \\ = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \frac{\exp(-j2\pi z/\lambda)}{j\lambda z} \\ \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z}(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3)\right] d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} U_{h,i}(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) \\ = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \\ \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z}\phi_2\right] d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \end{aligned} \quad (14)$$

(13)、(14)式を比較すると、ホログラムには位相項として三つの成分が記録されているが、ホログラフィック・ステレオグラムにはそのうち光線の方向を示す項 (ϕ_2) のみが記録されている。 ϕ_1 の項はホログラム面上の微小領域における位相分布、 ϕ_3 の項はホログラム面上の離れた領域から再生される波面の相対的位相差を表している。真のホログラムにおいては、これらの位相項によりホログラム面のすべての点からの光の位相が再生像上で一致する。ホログラフィック・ステレオグラムには一部の位相項が記録されていないため、再生像の分解能が劣るものと考えられる。

ここで(13)式のホログラムに記録された波面の位相項のうち、 ϕ_2 および ϕ_3 のみを記録したものを考えてみる。このようなホログラムを作成したとき、その再生波面はホログラム面直後で

$$\begin{aligned} U_{PAS}(x_j + \Delta x_h, y_j + \Delta y_h) \\ = \iiint g(x_j + \Delta x_0, y_j + \Delta y_0, z) \\ \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z}(\phi_2 + \phi_3)\right] d\Delta x_0 d\Delta y_0 dz \end{aligned} \quad (15)$$

となる。(1)から(3)式の逆の手順により、Fig. 1 の合成光学系で記録するための原画パターン $f_{PAS}(\xi, \eta)$ を求めることができる。

$$\begin{aligned} f_{PAS}(\xi, \eta) = \int g\left(-\frac{z}{f}\xi + x_j, -\frac{z}{f}\eta + y_j, z\right) \\ \exp\left[-j\frac{\pi z}{\lambda f^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] dz \end{aligned} \quad (16)$$

これは(1)式のホログラフィック・ステレオグラムの原画に対し、物体の奥行きに応じた位相を付加したものであり、ここではこれを位相を付加したステレオグラム (phase added stereogram: PAS) と呼ぶ。(15)式に示されるように、PASはホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つものである。これら3種類のメディアを比較してみると、ホログラム面近傍での再生像の解像度は、ホログラフィック・ステレオグラムや PAS においてはホログラム面上でのサンプリングにより制限されるのに対し、真のホログラムにおいては感材の分解能により決まる。一般的には前者は 0.01 mm から 0.1 mm で、後者は光の波長と同程度である。そしてホログラム面から離れた位置の再生像の分解能は、ホログラムにおいては理想的にはホログラムの大きさによる回折限界で決定され、ホログラフィック・ステレオグラムの場合は3章で述べたような回折の影響により制限される。一方 PAS においては異なる要素ホログラムからの光の位相が正しく再生されるため、ホログラム面から離れた位置でも比較的高い解像度の再生像が得られる。実際にはホログラム面や視差方向に対するサンプリングの影響により、真のホログラムよりは再生像の解像度は低い。サンプリングの問題に関してはここでは詳しくは触れないが、ディスプレイとしては、例えばホログラム面近傍で真のホログラムの持つ波長程度の分解能は必要なく、PAS を用いることで十分に満足な画質が得られる場合も多いと思われる。

このように PAS を考えることにより、ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの違いはより明確になる。表示する物体がある奥行き範囲内であればホログラフィック・ステレオグラムでも記録されていない成分の影響は少ないと考えられ、ディスプレイとしてはホログラムとの違いは少ない。

5. 実 験

ホログラム、ホログラフィック・ステレオグラム、PAS の特性を比較するため基礎的な実験を行った。ここでは 32×32 画素の文字フォントパターンの2次元画像をホログラム面から 200 mm の位置に再生するようなホログラムをそれぞれの方法で作成し、レーザー光で再生することによってその再生像を比較する。ホログラムは干渉縞パターンをコンピュータを用いて計算し、モニタに表示したパターンをカメラを用いて写真縮小することで作成した。フレネル型ホログラムとしては、文字フォントの画像をフレネル変換し参照光との干渉縞を計

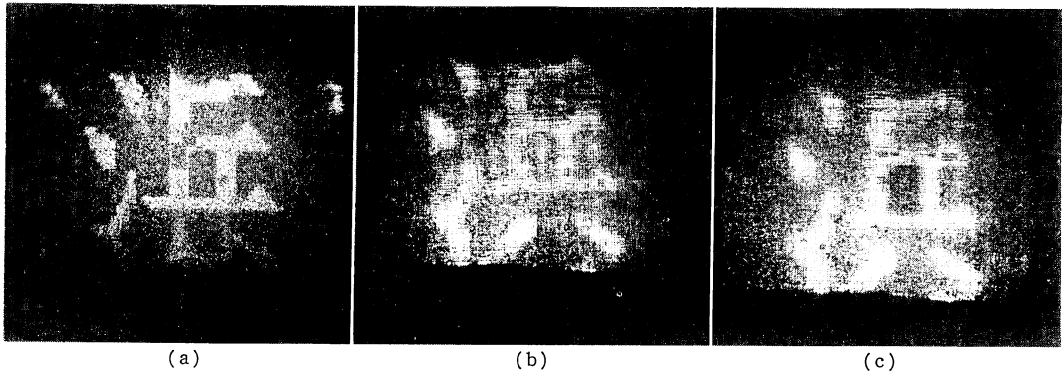


Fig. 5 Reconstructed images from CGHs computed by the equations of (a) Fresnel diffraction, (b) holographic stereogram, and (c) PAS.

算した。またホログラフィック・ステレオグラムおよびPASの計算においては、0.25 mm ピッチ、 32×32 点の要素ホログラムのための原画をコンピュータ・グラフィックスの手法を用いて計算し、各原画をフーリエ変換して参照光との干渉縞を求めた。PASの計算においては、フーリエ変換する前の原画の各点に z パツファのデータから(16)式に従って位相を付加する。(16)式の積分は半透明物体において複数の物体表面を投影する計算を表しており、ここでは反射物体を用いているためこの積分の必要はない。したがって、原画の各点に対してその点に投影された物体の奥行き(z)に対応する位相を与えることで原画の計算を行った。

それぞれの再生像の写真を **Fig. 5** に示す。フレネルホログラムからはクリアな像が再生されているが、ホログラフィック・ステレオグラムからの再生像には特に文字のエッジの付近に回折の影響と思われるアーティファクトがみられる。しかし PAS にはそのようなアーティファクトは観察されず、ホログラフィック・ステレオグラムよりも優れた画像が得られていることがわかる。このように本実験では第3、4章の解析と一致する結果を得ることができた。

6. 結 論

本研究では、ホログラフィック・ステレオグラムによる像再生に関して回折を考慮した解析を行い、ホログラムとの相違に関して検討を行った。要素ホログラムおよび視差方向のサンプリングピッチが十分細かい場合において、まず記録光学系の配置と再生像に対する回折の影響の定式化を行い、実験によりその特性を確認した。またホログラム面直後における再生波面をホログラム、ホログラフィック・ステレオグラムにおいて比較することにより、ホログラフィック・ステレオグラムに記録され

ていない波面の成分を明らかにした。そしてホログラフィック・ステレオグラムの原画像の各画素に対して物体の奥行きに応じた位相を付加して記録することにより、位相を付加したステレオグラム (PAS) を考え、回折による劣化の影響が少ないことを示した。ホログラムとホログラフィック・ステレオグラムの中間的な性質を持つ PAS を考えることにより、両者の相違はより明確にすることができる。ホログラム面から離れた位置に像が再生される場合に、ホログラフィック・ステレオグラムでは回折の影響により像が劣化を受けるのに対して PAS や真のホログラムではそのような劣化はない。さらにフレネル型ホログラム、ホログラフィック・ステレオグラム、PAS を写真縮小法による計算機ホログラムとして作成する実験を行い、上記の解析を確認した。

ホログラフィック・ステレオグラムの画質を制限する要因としては、本論文で調べた回折の影響の他に、1) 視差方向や画像面におけるサンプリングの影響、2) 白色光再生の場合における波長分散による像のボケ、3) 拡散板の特性等のホログラム露光条件の問題、等が考えられ、現実にはこのような問題の影響も大きい。したがってこれらのさまざまな影響との関連を含めて考慮する必要がある。しかし近年、より高画質のホログラフィック・ステレオグラムを作成する技術が進歩しつつあり、回折の影響に関して明らかにしておくことは重要と考えられる。また、本論文ではすべてコヒーレント光による再生に関して検討を行ったが、ハードコピーとしてのホログラムの場合はインコヒーレント光で再生される。したがって厳密には再生光のコヒーレンスによる影響についても考慮する必要がある。多くの場合再生像の限界は白色光再生であることや光源の広がり等による影響が大きいが¹³⁾、ここでは行った解析はそのような問題を解決された場合に関するものである。

本稿ではホログラフィック・ステレオグラムによる立体像の再生に関して検討を行ったが、立体像表示法としては他にレンチキュラー板を用いた方法や奥行き方向に像を走査する方法等が開発されており、これらのメディアとホログラムやホログラフィック・ステレオグラムの立体像の表示能力に関して明らかにすることは今後重要な課題であると考えられる。

ここで提案したPASは、ホログラフィック・ステレオグラムの原画に対して位相を付加することによって作成できるものであり、計算機ホログラム(CGH)の計算法としても有効と考えられる¹⁰⁾。PASを利用することによって、CGHの生成における計算量を削減することが可能である。また、隠面消去、面の拡散特性等のコンピュータグラフィックスの技法を利用することができる。ホログラフィック・ステレオグラムの手法を用いてCGHを作成する手法は提案されているが⁹⁾、本研究により明らかなようにPASを用いることによりより深い奥行き像を再生することができる。

本稿で述べた一部の実験は本学修士過程杉浦氏(現(株)キャノン)の協力により行った。また、本研究の一部は(財)神奈川科学技術アカデミーの助成により行われた。

文 献

- 1) M. Yamaguchi, N. Ohyama and T. Honda: "Holographic three-dimensional printer: new method," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 217-222.
- 2) S. A. Benton: "Experiments in holographic video imaging," *Holography Comemorating the 90th Anniversary of the Birth of Dennis Gabor*, eds P. Greguss and T. H. Jeong, SPIE Institutes for Advanced Optical Technologies, **IS8** (1990) pp. 247-267.
- 3) D. J. DeBitetto: "Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings," *Appl. Opt.*, **8** (1969) 1740-1741.
- 4) M. Yamaguchi, H. Sugiura, T. Honda and N. Ohyama: "Automatic recording method for holographic three dimensional animation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1200-1205.
- 5) M. C. King, A. M. Noll and D. H. Berry: "A new approach to computer generated holography," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 471-475.
- 6) I. Glaser: "Anamorphic imagery in holographic stereograms," *Opt. Commun.*, **7** (1973) 323-326.
- 7) I. Glaser and A. A. Freasem: "Imaging properties of holographic stereograms," *Three-Dimensional Imaging*, ed. S. A. Benton, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **120** (1977) pp. 150-162.
- 8) T. Yatagai: "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms," *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2722-2729.
- 9) T. Honda, K. Okada and J. Tsujiuchi: "3-D distortion of observed images reconstructed from a cylindrical holographic stereogram. (1) Laser reconstruction type," *Opt. Commun.*, **36** (1981) 11-16; K. Okada, T. Honda and J. Tsujiuchi: "3-D distortion of observed images reconstructed from a cylindrical holographic stereogram. (2) White light reconstruction type," *Opt. Commun.*, **36** (1981) 17-21.
- 10) M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda and N. Ohyama: "Phase added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique," *Practical Holography VI*, ed. S. A. Benton, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **1914** (1993) in press.
- 11) M. Yamaguchi, H. Endoh, N. Ohyama and T. Honda: "High quality recording of a full-parallax holographic stereogram using a digital diffuser," submitted to *Opt. Lett.*
- 12) R. L. Fusek and L. Huff: "Use of holographic lens for producing cylindrical holographic stereograms," *Opt. Eng.*, **20** (1981) 236-240.
- 13) G. B. Brandt: "Image plane holography," *Appl. Opt.*, **8** (1969) 1421-1429.