



Title	360度ホログラムの再生像特性
Author(s)	佐藤, 龍司; Sato, Ryuji; 村田, 和美 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 125, 103-109
Issue Date	1985-03-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41903
Type	departmental bulletin paper
File Information	125_103-110.pdf



360度ホログラムの再生像特性

佐藤 龍司 村田 和美

(昭和59年11月30日受理)

Characteristics of Images Reconstructed from 360° Hologram

Ryuji SATO and Kazumi MURATA

(Received November 30, 1984)

Abstract

Characteristics of images reconstructed from two types of 360° holograms are discussed.

One is a cylindrical holographic stereogram which causes in principle a distortion of a reconstructed image. We analysed the 3-D distortion due to the geometrical set-up in making the stereogram and in observing the reconstructed image. The condition which decreases the distortion is determined. As an example, using a cubic frame as an object, a comparison of the calculated result with the experimental one is also run.

The other is a cylindrical rainbow hologram. We propose a new technique using unique mirror elements. The same as an ordinary rainbow hologram, image blur due to the wavelength spread is discussed. The calculated result is compared with the experimental one regarding the image blur. In the case of the cylindrical rainbow hologram, the object size or visual field is restricted. The effective visual field is also discussed.

1. はじめに

ホログラフィーを3次元物体の表示に応用するホログラフィックディスプレイにおける最近の動向として、(1)視域を広くすること、(2)明るい再生像を得ることの2つが盛んに取り上げられ、そのための種々の新しい技術が報告されている^{1,2,3)}。(1)の視域拡大については、ホログラムを円筒型にする方向に、(2)の明るい再生像については、白色光再生型にする方向にあり、具体的にはそれぞれホログラフィックステレオグラムやレインボウホログラムが普及しつつある。しかしながら前者は再生像が歪むという欠点、そして後者は視域が狭いという欠点を持っている。

我々は、まず円筒型のホログラフィックステレオグラムの再生歪を解析することによって歪を軽減する条件を見い出し、またレインボウホログラムを円筒型にする新しい技術を考案して視域拡大とともに明るい再生像を得る方法を提案し実験によって確めたので報告する。

2. ホログラフィックステレオグラム

2.1 作製方法

ホログラフィックステレオグラムは⁴⁾、物体を拡大、縮小して再生したり、動作のある物体も再生できるホログラムで、その作製方法の違いから、平面型と同筒型に、またレーザー光再生型と白色光再生型に分類することができる。我々は、レーザー光再生型の円筒型ホログラフィックステレオグラム (Cylindrical Holographic Stereogram, 以下 CHS と略す。) について解析する。白色光再生型については再生原理が3章で述べるレインボウホログラムと共通部分があるため簡単な記述に留める。

Fig.1(a)のように、まず物件を回転テーブルに載せ、一定速度で回転させて映画用撮影カメラで撮影する。この時物体を照明する光は通常の白色光でよい。次に、撮影したフィルムをポジに反転現像し、Fig.2(b)のごとく、レーザー光でフィルムの1枚の画像を拡散板上に結像し、これを透過散乱する物体光とし、鉛直方向に細長いスリット板を通してホログラム記録する。この時参照光は拡散板の真下の点光源からの球面波で照射する。さらに次の画像を、ホログラム感光面をスリット幅の分だけ移動して同様の記録を行う。順次これを繰り返すことによって、スリット状のホログラム (要素ホログラムと呼ぶ。) がたくさん並んだものが記録される。これを円筒状にまとめたものが CHS

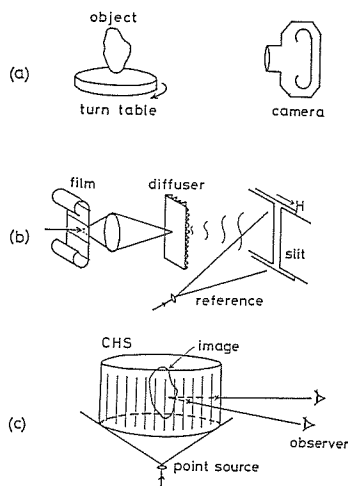


Fig.1 Schematic diagram of making and observing CHS.
 a) Taking pictures of the object.
 b) Making CHS.
 c) Reconstructing from CHS and observing the image.

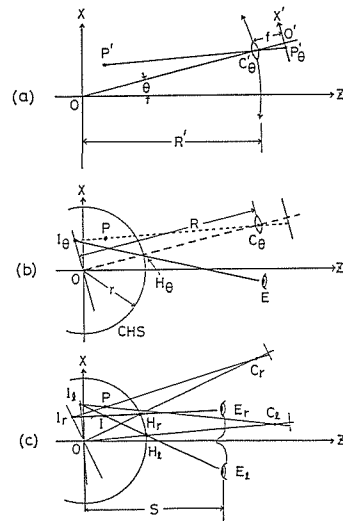


Fig.2 Geometrical set-up of CHS.
 a) Taking a picture of an object point P.
 b) Reconstruction from elementary hologram H_0 and its observation by a single eye E.
 c) Reconstruction from two elementary holograms H_l , H_r and their observation by both eyes E_l , E_r .

と呼ばれるホログラムである。Fig.1(c)のように CHS の円筒の中心軸の真下に再生照明用点光源をおいて、これからの球面波で照明すると、観察者は同時に何枚かの要素ホログラムからの再生像を見ることができ、かつ両眼視差によってその合成像として立体的な再生像を認識できる。

2.2 再生像の歪

2.1で述べたように、CHSの再生像は合成立体像であるため、像が歪んでしまうことは避けられない。この歪は物体の撮影系、ホログラムの記録系、再生時の観察者の位置などの幾何学的配置に起因している。そこで、我々はこれらの因子による歪の影響を解析し、歪の少ないCHSを得る条件を求めてみる。それには1つの点物体を考え、それがどこに再生されるのか求め、理想像点と比較すればよい。Fig.2はFig.1を上から見た幾何学的配置を示したものである。CHSの円筒の中心軸をy軸、円筒の断面がxz面になるように直交座標を考える。Fig.2(a)のように、物体の撮影距離を R' とし、xz面内にカメラを置いて物体 P' を撮影する。この時カメラの光軸がz軸となす角度を θ 、レンズの位置を C'_0 、レンズの焦点距離を f とすると、物体上の任意の点 P' は、カメラのフィルム上では P'_0 の位置に記録されたとする。次にFig.2(b)のごとく、ポジに現像されたフィルムを拡散板上に拡大投影すれば、拡大倍率を m （物体とCHSが再生する像との倍率）として、近似的に $I_0 \approx mP' = mP'_0R'/f$ の位置にホログラムの物点が存在することになる。この I_0 を物体とした1つの要素ホログラム H_0 に記録し半径 r のCHSとして再生する時、観察者は $\overline{I_0H_0}$ の直線に瞳 E を置けば、像点 I_0 を観察できる。なお、ここで以後の計算を簡単にするために、すでに倍率のかかった諸量として物点の位置、撮影距離、カメラの位置を $P' \rightarrow P$ 、 $R' \rightarrow R$ 、 $C'_0 \rightarrow C_0$ と置換えて取扱う。次にFig.2(c)では、左右それぞれの瞳 E_L 、 E_R は、別々の要素ホログラム H_L 、 H_R を通して撮影方向の異なった物点 P の再生像点 I_L 、 I_R を見ている。この両眼の視線の交点または最近接中点が、合成再生像点 I となる。理想像点 P というのは、 I_L 、 I_R からカメラの方向に向う直線の交点に位置するので、 P と I の位置の差異が歪となる。

2.3 解析結果と実験結果

実際に歪が生じる原因としては、Fig.2から明らかなように、初めの物体の撮影距離 R 、CHSの円筒半径 r 、観察距離 S (Fig.2(c)に記載)によるものと理解できる。そこで、 P 、 I の座標をそれぞれ $P(x_p, y_p, z_p)$ 、 $I(x_i, y_i, z_i)$ として P から I への変換で、 R 、 r 、 S のパラメータを用いて $I=f(P, R, r, S)$ の関係式を求めて歪の特性を解析した。計算手順は、2.2で述べたように物体の撮影、ホログラムの記録再生の各過程を追って順次計算すればよい^{5,6,7)}。

得られた変換式から、 $P(x_p, y_p, z_p)$ 、 $I(x_i, y_i, z_i)$ の各座標に対して、

$$\Delta x_D = (x_i - x_p) / x_p, \quad \Delta y_D = (y_i - y_p) / y_p, \quad \Delta z_D = (z_i - z_p) / z_p \quad (1)$$

を定義すれば、 Δx_D は横方向、 Δy_D は高さ方向、 Δz_D は奥行方向の歪曲収差をそれぞれ表わす。

今、1辺が10cmの方立方体を物体としてCHSを作製再生すると仮定して、立方体の稜線上の点を細かくサンプルして計算して、どのような歪が得られるかを解析した。

Fig.3は計算結果の1例を示したものである。円筒半径 r の変化に対する再生像の形と歪曲収差の変化を示している。 r が大きい程、歪が少なくなるのがわかる。また、 R 、 S に関する結果とも比較すると、 $r=R$ の場合、 $\Delta x_D = \Delta z_D = 0$ とすることはできるが、逆に Δy_D は大きな値となってしまうことがわかった。一方、 $S=R$ とすると Δy_D の値が最も小さくなるという結果も得られた。これらの結果から、 $R=2r$ とすると、 Δx_D 、 Δy_D 、 Δz_D ともに場所によって極端な歪をとまなわない再生像が得られると思われる。

Fig.4はFig.3(b)に示した場合と同じ条件で1辺が10cmの立方体を物体として実験的に作製したCHSからの再生像を示す。写真は単眼による像と同等であるので、観察者の左眼、右眼の位置か

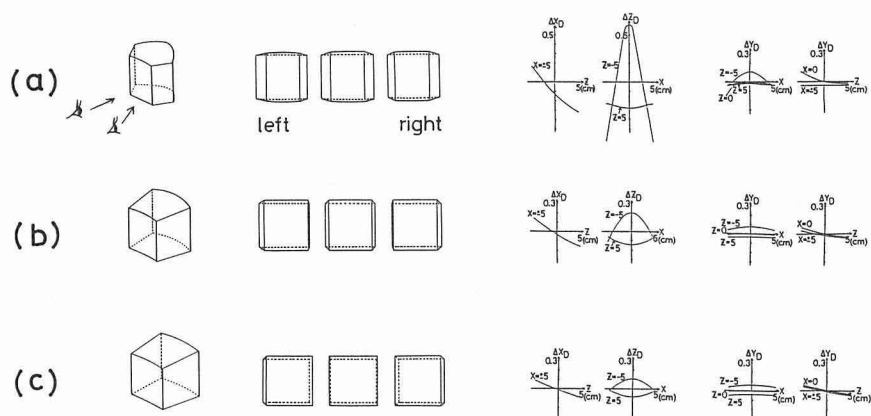


Fig.3 Variations of reconstructed images and their distortions with respect to r in the case of $R=100\text{cm}$ and $s=50\text{cm}$.
a) $r=11.5\text{cm}$ b) $r=23\text{cm}$ c) $r=34.5\text{cm}$

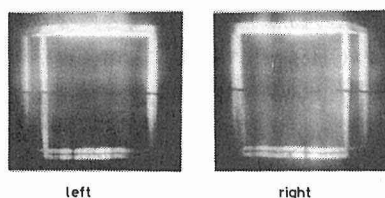


Fig.4 Reconstructed images of a cubic frame of 10 cm from CHS experimentally. Left is taken from a left eye position and right from a right eye position. Geometrical set-up are $r=23\text{cm}$, $R=100\text{cm}$ and $S=50\text{cm}$.

ら撮影したもので、再生像の歪が計算結果と比較してよく一致しているのがわかる。

なお、白色光再生型のCHS (マルチプレックスホログラム (MH) と呼ぶ。) は、Fig.1(b)における拡散板をシリンドリカルレンズに置換えることによって作製され、再生段階には白色光を用いるので、上記の歪以外に波長分散による歪もともなうが、この歪については次章で説明する。

3. レインボウホログラム

3.1 作製方法

レインボウホログラム (Rainbow Hologram, 以下RHと略す。) は、S. A. Benton⁹⁾によって考案されたもので、まずレーザーによって記録した通常のホログラムに水平方向のスリットを置き、このホログラムの細長い部分から実像を再生する。この実像を物体光として2次ホログラムに記録したものがRHである。記録されたRHに参照光とは共役な再生照明光を与えると、スリットの実像が再生されるので、この位置に瞳を置くと再生像を観察することができる。しかも白色光照明すると、波長分散によってスリット像が各波長に対応した色で垂直方向に分散して再生されるの

で、観察者は頭を上下することによって虹色に変化した再生像を観察することができる。

3.2 円筒型レインボウホログラム

RHは1次ホログラム(First Hologram, 以下FHと略す。)の水平方向の大きさによって視域が制限される。この視域を拡大するためにはFH, RHともに円筒型にすることによって得られる。我々は円筒型のFHについては、以前に報告したコニカルカバーによるホログラム⁹⁾を用いた。またRHの作製にはFHからの実像再生光及び円筒型RH(Cylindrical RH, 以下CRHと略す。)記録系の参照光に、コニカルミラーと円筒ミラーを用いて光学系を組むことで解決した。Fig.5はCRHの作製系(a)と再生系(b)を示す。2分割されたレーザー光を両面が反射面となっているミラーM₁で上下に反射させ、上記のごとく実像再生光と参照光を与えている。Fig.6は3個のサイコロのCRHからの再生像を示し、いろいろの角度からサイコロが再生されていることがわかる。この実験におけるFHの半径は25cm, CRHの半径は5cmとした。

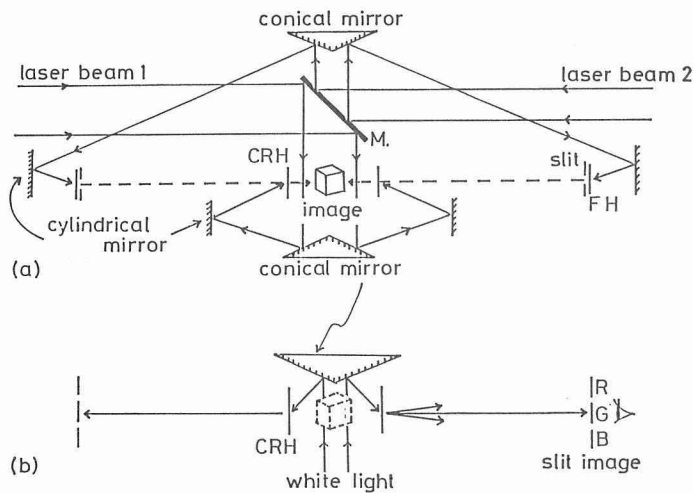


Fig.5 a) Optical set-up for recording of CRH.
b) Optical set-up for reconstructing of CRH.

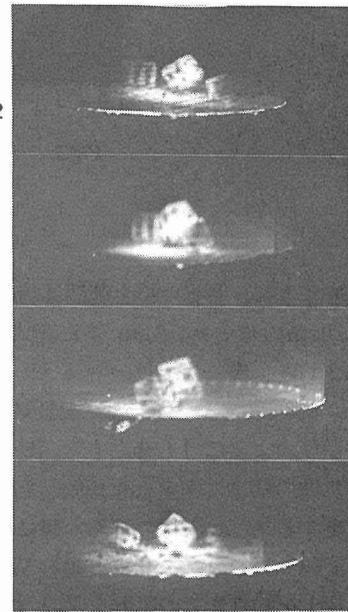


Fig.6 Reconstructed images from CRH viewed from various directions.

3.3 物体の大きさ

通常のRHは波長分散による像ぼけを少なくするため、イメージホログラムとして記録するが、CRHの場合は円筒の内側すなわちホログラムから離れた位置に物体の像が再生されなければ、見る方向によって観察されない部分が出て来るので、物体の大きさ(視野)が制限される。CRHの半径をLとすると、物体の最大領域はCRHの水平方向の最大再生回折角 ϕ に依存する。Fig.7(a)はCRHを上方から見てこれらの関係を示したもので、半径lの斜線部が物体の最大領域で、Sは光源、Eは瞳の位置、 ψ は視野角である。幾何学的にlと ψ は、

$$l = L \sin \phi \quad (2)$$

$$\psi = 2 \arcsin \left\{ \frac{L \sin \phi}{L + Z_s} \right\} \quad (3)$$

と求められる。 ϕ の値は感光材料によって若干異なるが、我々はホログラム作製にAgfa10E75を用いたので、この感光材料を角度スケールを物体としてホログラム記録し再生すると、Fig.7(b)に示

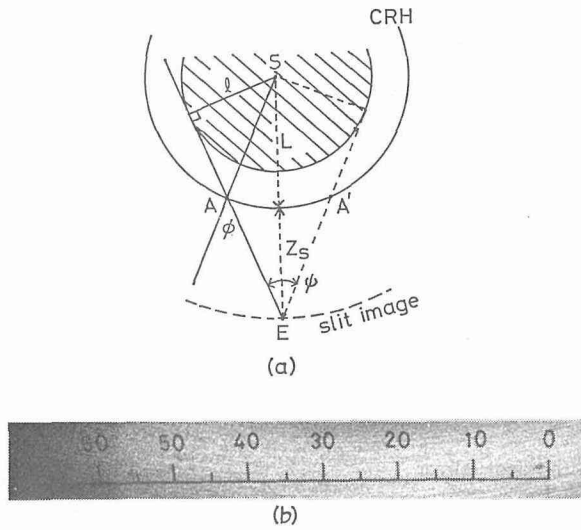


Fig.7 Analysis of the object size or the visual field.
 a) Maximum size of reconstructing field.
 b) Reconstructed image of angular scale object.

すように、明るい再生範囲は約60度であった。従って(2)式より、 $l \approx 0.87R$ となり、 $L=5\text{cm}$ 、 $Z_s=20\text{cm}$ の時 $l \approx 4.3\text{cm}$ 。また(3)式より $\psi \approx 20$ 度を得た。

3.4 像ぼけ

3.3でも述べたように、RHの像ぼけというのは波長分散によるものである。また、再生光源の拡がりによるぼけも存在する。我々は、J. C. Wyant¹⁰⁾の解析した計算結果と実際のRHから再生された像のぼけの測定とを比較した。Wyantによれば、波長分散によって再生された各スペクトルに対応するスリット像のうち、瞳に入射するスペクトル領域($\delta\lambda$)によって像ぼけが決定される。今、記録波長を λ 、スリット幅を W 、瞳の直径 D 、参照光の角度を θ 、FHからRHまでの距離を Z_s 、RHを物点までの距離を Z_p とすると、 $\delta\lambda$ と像ぼけ δp は、

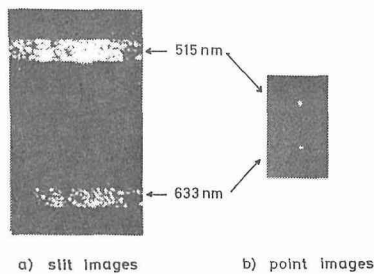


Fig.8 a) Slit images from RH with 633nm and 515nm.
 b) Point images from RH with 633nm and 515nm.

$$\delta\lambda \approx \lambda (W+D) / (Z_s \sin \theta) \quad (4)$$

$$\delta p \approx Z_p (W+D) / Z_s = (Z_p \sin \theta / \lambda) \delta\lambda \quad (5)$$

で与えられる。

例えば、 $\lambda = 633\text{nm}$, $W = D = 3\text{mm}$, $\theta = 40^\circ$, $Z_s = 20\text{cm}$, $Z_p = 5\text{cm}$ の場合、 $\delta\lambda \approx 30\text{nm}$, $\delta p \approx 1.5\text{mm}$ となる。Fig.8は同じ条件で記録した物点のRHを $\lambda = 633\text{nm}$ と 515nm で同時に再生した時のスリット像(a)と再生像(b)を示したもので、これらの間隔を測定して像ぼけを推定すると、 $\delta\lambda \approx 32\text{nm}$, $\delta p \approx 1.6\text{mm}$ となり、計算結果とよく一致しているのがわかる。

前章で述べた白色光再生型CHSに関しても、CRHと同じ再生原理なので同様な結果を得るが、歪んだものとなる。

4. お わ り に

我々は、水平方向に360度まで視域を広げたホログラムの作製と再生を検討し、その再生像の特性、例えば歪やぼけ、そして視野の制限について解析と測定をした。CHSについては、たくさんの2次元画像をスリット状のホログラムとして合成したために生じる像歪が最大の問題であった。これは撮影距離R、CHSの円筒半径r、観察距離Sによって変化し、一義的に歪を緩和する条件を定められない事情もあるが、 $R = S$ または $R = 2r$ とすると比較的歪が目立たないことがわかった。CRHについては、コンカルミラーや円筒ミラーを用いて直径10cmのCRHが作製された。それにとまなう物体(視野)の制限が生じ、CRHの半径をLとして、 $L \sin \phi$ (ϕ はCRHの最大再生回折角)以下であればよいという結果を得た。また、波長分散による像ぼけの計算結果と実験結果との比較も行なった。

CHSは現在、単にディスプレイとしてばかりでなく、医療診断にも応用されつつあり、かなり期待が寄せられている。CRHも、もっと大きなものを作製できるようになれば、今後干渉測定などにも応用することができると思われる。

References

- 1) E. N. Leith: Sci. Am., (1976) Dec.
- 2) S. A. Benton: Opt. Eng., 19, (1980) 5, p.686.
- 3) T. Okoshi: Proc. IEEE, 68, (1980) 5, p.548.
- 4) T. Kasahara, Y. Kimura and M. Kawai: Applications of Holography, (1971) p.19, Plenum Press.
- 5) I. Glaser and A. A. Friesem: Proc. SPIE, 120, (1977) p.150.
- 6) T. Honda, K. Okada and J. Tsujiuchi: Opt. Commun., 36, (1981) 1, p.11.
- 7) 佐藤龍司, 村田和美: 光学, 11, (1982) 3, p.280.
- 8) S. A. Benton: J. Opt. Soc. Am., 59, (1969) 11, p.1545A.
- 9) K. Murata and K. Kunugi: Appl. Opt., 16, (1977) 7, p.1978.
- 10) J. C. Wyant: Opt. Lett., 1, (1978) 4, p.130.