

90° フレネルホログラフィ

内 田 直

(昭和55年9月30日受理)

90° Fresnel Holography

Sunao UCHIDA

(Received September 30, 1980)

はじめに

ガボール¹⁾によって最初に考案されたホログラフィは、干渉性の高い単色光源としてのレーザーの開発を受けてリースら²⁾が発展させることに成功した。更にデニスクによるリップマン形ホログラムの白色光再生の開発などもあり、ホログラフィは急速な発展を遂げた。現在、情報処理へのホログラフィの応用は実用化されつつあるが、白色光再生による立体写真は種々の困難が伴っているためか、一部の商業用や芸術家に受け入れられている程度である。

通常われわれの使っている写真は、人物や景色の立体情報や図面等の平面情報などを、われわれの眼と似た機構に作られたレンズを通して、写真フィルム上に2次元像として物体上から来る光の強度に比例した像を作る。一方、ホログラフィは物体から来る光の振幅情報のみならず、位相情報をも含めてフィルム面上に干渉縞として記録し、これを第2段階として再生することによりもとと全く同じ像の情報を得るものである。ここでは物体を中心に置いてこれを取り巻くように90°の範囲にフィルム面を設置し、このフィルム面に物体の周囲の情報を90°の範囲で捕えるホログラムを作成し、再生を行ったので報告する。

干渉縞の格子間隔

ホログラフィは物体光に含まれる振幅情報と位相情報を記録する。その方法は物体光とそれに可干渉な参照光を同時に写真フィルム面上にあてることによって、微細な干渉縞をフィルム面上にホログラムとして記録する。

フィルム面上に記録された干渉縞は、通常の実像処理によって固定されるが、ホログラム上には通常の写真のような物体の像は生じないで、単に非常に細かな1ミリ当たり数百本からなる干渉縞の強度分布に対応した濃度分布を呈するのみである。このホログラムを露光時の位置に置き、参照光のみを与える時物体のもとの位置に完全にもと通りの像が観察される。また、再生用参照光の波長を変えることによって再生像の拡大率は変わる。

さて、ホログラム上には物体光と参照光の2つの波の微細な干渉縞が生ずるが、簡単のため Σ_1 と Σ_2 なる2つの平面波の干渉を考える。この場合の干渉縞は直線状に現われる。図1に示すように Σ_1 と Σ_2 の波のなす角を α とし、 y 軸と角 β をなすように置かれたフィルム上に Σ_1 と Σ_2 による干渉縞が記録されるとする。縞の間隔を d とすれば

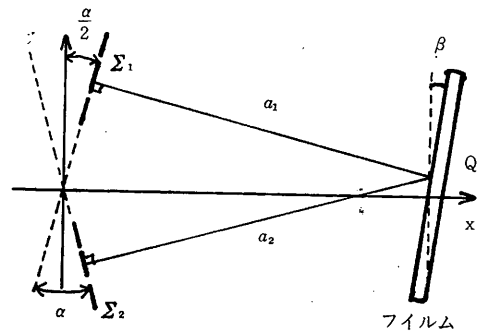


図1 2つの波の干渉

y 軸に対しそれぞれ $\alpha/2$ をなす2つの平面波、互に角 α をなす Σ_1 と Σ_2 が、 y 軸と角 β をなすフィルム上で干渉する時フィルム上の一点 Q から Σ_1 , Σ_2 それぞれまでの距離 a_1 , a_2 とすればその光路差によって干渉縞が定まる。

表 1 干渉縞の格子定数 k (本/mm) の値

α	$\beta=0^\circ$	$\beta=10^\circ$
10°	279	275
20	557	548
40	1097	1080
60	1603	1579
80	2061	2030
100	2456	2419
120	2777	2734
140	3013	2967
160	3158	3109
180	3206	3157

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta} \quad (1)$$

である。ここに λ は波 Σ_1 と Σ_2 に共通な波長である。今、1 ミリメートル当りの格子数を k とすれば λ を mm 単位として

$$k = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \beta}{\lambda} \quad (\text{本/mm}) \quad (2)$$

となる。表 1 に $\lambda = 6.328 \times 10^{-4} \text{ mm}$ として、 β が 0° 及び 10° の時の α のいくつかの値に対する k の値を示す。

実際のホログラムの作成においては、参照光や物体光

の波面は必ずしも平面波ではなく、球面波となる。フレネルホログラフィでは、物体の各点から出た光が有限な距離にあるフィルム上に達するようにするので、球面波となる。しかし、フィルム上の微小な部分だけに注目すれば、2つの方向から来た平面波による干渉とみることができる。表 1 においてフィルム面の傾き角 β の値が 10° くらいでは、格子定数 k への影響は考えなくてもよい。物体光と参照光のなす角 α が 20° くらいの時、格子定数 k は 500 本/mm を越えてしまい、通常のコピーフィルムの解像力である 200 本/mm 程度では間に合わない。ホログラフィ用に種々なフィルムが供給されているが、ここではコダック SO-253 フィルムを使った。このフィルムは 70 ミリフィルムが供給され、35 ミリフィルムに比べ幅が適当に広く、円形ホログラフィに適している。解像力も公称 1250 本/mm あり、表 1 からみて $\alpha = 40^\circ$ くらいまでカバーできる。

実験方法

図 2 に示す配置図でホログラムの作成と再生を行った装置の全体は砂とゴム板および雑誌からなる除振台に置かれている。ビームスプリッター (B.S.) やミラーおよびホログラム面は同一の光学台上に置かれている。レーザーとシャッターはこれから少し離れて熱や振動の影響

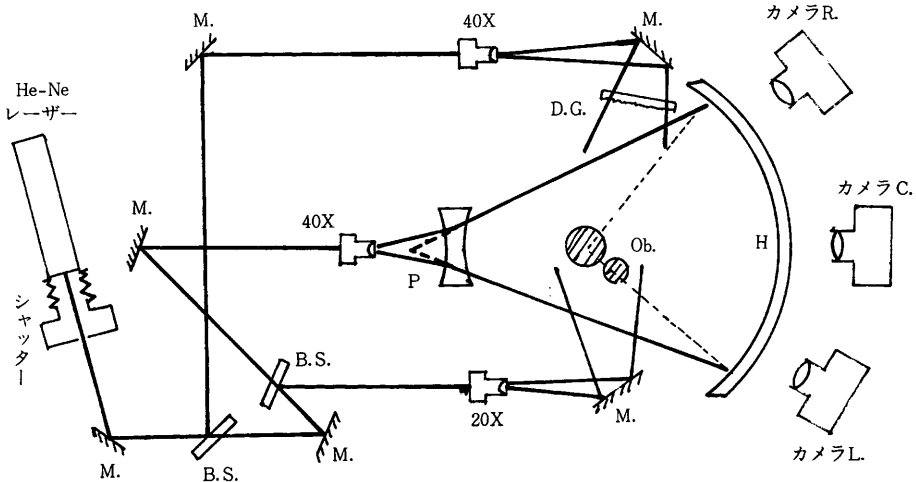


図 2 ホログラフィ撮影図

He-Ne ガスレーザーから出た光はシャッターの開閉により必要な露光をホログラム面 H に与えるようになっている。M. は全反射ミラーであり、B.S. はハーフミラーで光量を透過光と反射光に 2 分割する。40 X, 20 X としたものは顕微鏡の対物レンズでレーザービームを拡げて球面波とする役目をする。D.G. はスリガラスからなる拡散板であり、Ob. が物体である。

表 2 干渉フィルターの特性値

形 名	透過中心波長 (nm)	最大透過率 (%)	半 値 幅 (nm)
青	468.5	37.3	16.0
緑	528.0	38.5	16.0
赤	627.0	38.0	17.5

を少なくしてある。光源のレーザーは波長 λ が 632.8 nm で出力 5 mW の小型の He-Ne レーザーであり、ここから出た光線はカメラを利用したシャッターを通してミラーとビームスプリッターにより分けられ、顕微鏡の対物レンズにより球面波として参照光および物体照明光となる。物体照明光の一方には拡散板を置き物体による極端な反射光を和らげている。他方の物体照明光は輝度が不足するので拡散板は入れてない。参照光は40倍の対物レンズに加えて凹レンズにより球面波の曲率を大きくした。したがって参照光の光源位置は凹レンズと対物レンズの間の P 点に来る。この P 点にはホログラム作成時において参照光の光量調節のため、濃度 0.6、透過率 25% の ND フィルターを挿入した外、ジルコンランプを光源とした再生系においてその点光源位置とした。この場合ジルコンランプの白色光から必要な単色光を得るため干渉フィルターを使用した。干渉フィルターの性能を表 2 に示す。

P 点とホログラム面との距離は 60 cm であり、ホログラム面の曲率半径は 30 cm で、物体はこの曲率中心に置かれた。このホログラム面は物体の周囲を 90° の範囲まで捕えるようになっている。このままではカメラ C. の中央位置では参照光と物体光が重なってしまうので、参照光の中心線はホログラム面中央の中心に来るようにしたまま、物体を参照光の中心線から下げた。この時ホログラム面と物体とが正対するようにしたので、参照光はホログラム面に 10° 程上方から照明することになった。図 3 のホログラムを設定する保持枠はアルミ材により自作したものであり、70 ミリフィルムを片側から上下に作られた溝に沿って挿入するようになっている。現像処理されたホログラムは再び撮影時の位置に置けるように、保持枠の反対側の所定の位置にフィルムのストッパーをつけてある。溝の幅はフィルムの厚さに正確に合わせたのではないので、撮影と再生時のフィルムの歪みによる差が少し生ずるものと思われるが、別に感光乳剤自身の収縮等による像のずれもあり、ここで必要とされる精度では影響はないと考えた。

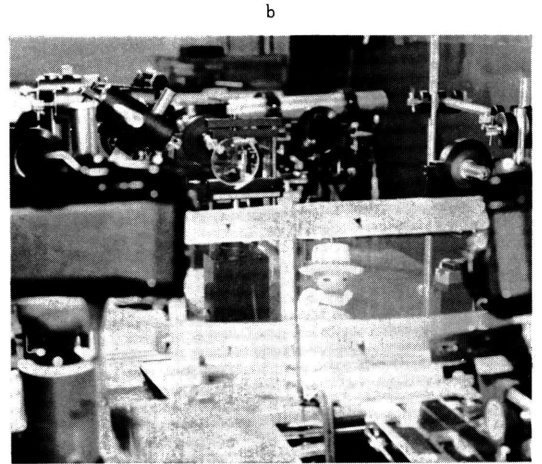
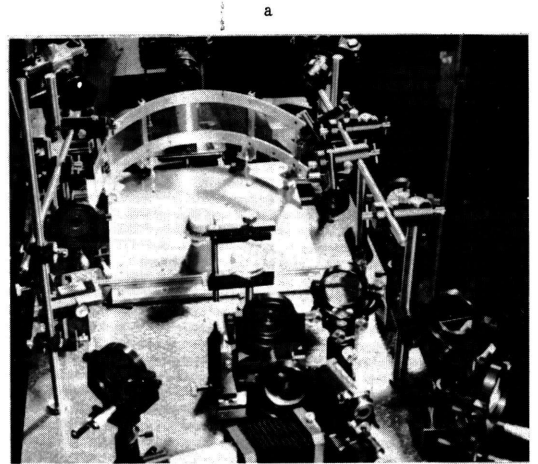


図 3 ホログラム撮影装置

a 図はホログラム撮影装置の全体を写したものであり、下方が光源で上方がホログラム面となる。実際の撮影では不要な光を遮るための黒いラシャ紙が入る。b 図はホログラム面の後方から見た物体でホログラム面に漂白ホログラムが入っているので半透明になっている。

ホログラムの撮影は、まず撮影装置のシャッターを閉じてレーザー光が漏れないよう遮断しておき、室内を全暗黒とする。次に所定の大きさに切断した未感光フィルムをホログラム枠に挿入する。明らかに分かる外部の振動を避けた後、必要な露光をシャッターの開閉によってフィルム面に与える。後はこのフィルムを現像処理すれば目的とするホログラムが得られる。露光時における外部からの微小な振動は、前記した防振法でかなり除くことができるが、数秒から数10秒の露光途中で外部から人体に

表 3 ホログラム作成処理工程

露 光	振幅ホログラム用として6~12秒 位相ホログラム用には30~70秒
硬膜処理	コダック SH-5 に浸し、ゆるやかにかくはんして10分間処理する。
水 洗	流水で30秒間洗い、良く水を切ってから現像処理に移る。
現 像	D-19, 24°C, 6分を基準にして途中30秒間隔でかくはんする。
停 止	コダック SB-1a により10~30秒間連続かくはんする。
定 着	スーパーフジフィックスにて3分間ゆるやかにかくはんする。
水 洗	流水にて30秒間
水洗促進	フジ QW により2分間処理する。
水 洗	流水にて5分間
そそぎ*1	50%アルコールにて2分
// 2	75%アルコールにて2分
// 3	90%アルコールにて2分処理して乾燥

*そそぎによりフィルム面の青色染料は完全に除かれる。

感ずるくらいの振動があった場合には、振動の影響が出

表 4 漂白ホログラムの作成

処理液	A液：重クロム酸アンモニウム	20 g
	濃硫酸	14 cc
	蒸留水	1000 cc
	B液：ヨウ化カリウム	128 g
	蒸留水	1000 cc
	C液：ヨウ化カリウム	220 g
	蒸留水	1000 cc
漂白処理準備：表3でそそぎ処理した振幅ホログラムを再び水洗し水になじませる。		
	A : B : 水 = 1 : 1 : 10	4~5分間処理する
水 洗		2分間
	C : 水 = 1 : 10	1分間処理する
水 洗		5分間
そそぎ		90%アルコール 2分

るかもしれないので注意を要した。

撮影されたフィルムは以下に示す現像処理を行なった。ここでは最終的に漂白による位相ホログラムを作成することもあり、通常の振幅ホログラムの作成も含めて表3に示す処理を行なった³⁾。露光されたフィルムは感光乳

カメラL.

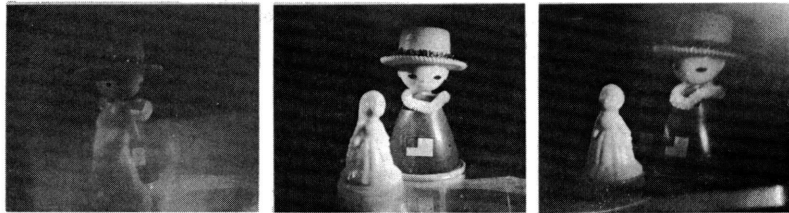
カメラC.

カメラR.

物 体
(レーザー光照明)



再 生
(振幅ホログラム)
の再生像



漂白再生
(位相ホログラム)
の再生像



図 4 ホログラム再生像

物体の写真は比較のためホログラム撮影時の物体照明光によって写されている。再生像は通常の振幅ホログラムからのものとこれを漂白して得られた漂白ホログラム(位相ホログラム)によるものを示した。

剂表面のゼラチン膜の損傷予防のために、コダック SH-5により硬膜処理した。この時フィルム中の青色染料が幾分溶解する。SH-5は通常高温現像用として使う場合の硬膜処理液で、現像時間はこの硬膜処理によって少し変える必要がある⁴⁾。SO-253フィルムはD-19現像液で20°C 6分が規定現像であるので、これを24°C 6分とした。ついでコダック SB 1a で現像を停止した後、酸性硬膜迅速定着液であるスーパーフジフィックスにより定着処理した。水洗処理は乳剤中の残留ハイポ除去のため、フジ QW で水洗促進処理を行なってから流水で行なった。ここでもフィルム中の青色染料は溶解するが、まだかなり残っている。充分な水洗を行なった後、50%、75%そして90%のアルコール中に2分間ずつ浸し青色染料を完全に除き、すすぎを行なった。振幅ホログラムはここで乾燥して得られる。一方位相ホログラム作成のための漂白処理は、以上のすすぎが終わった所で表4の手順で行なった。位相ホログラムについては漂白による散乱光の増加などがあるため、露光量を振幅ホログラムの数倍与えた。

結果と検討

図2にも示したようにカメラL.とR.が物体を捕える方向はおおよそ90°の角度をなしており、カメラC.はこれらの角のほぼ中心から物体を捕えたものである。物体は大小2つの人形で、小さい方は高さ6cm程であり、全体が真白なプラスチックからなっている。大きい方は10cm程の高さがあり、胴体が青色で反射率は良くない。カメラから物体までの距離は両物体の中間位置を基準にして、いずれも50cm程である。このくらい近い距離になると、カメラレンズの絞りを小さくしても被写界深度が深くできないので、撮影像のピントの合った位置は狭くなる。物体の拡がりは前後に5cmずつ程であり、背景は黒ラシャ紙により無反射とし、下面はアルミ板となっている。図4の物体とした3方向の写真は、以下の再生像と比較するため、ホログラム撮影の時の物体照明光のみで写したものである。台上の影をみると分かるが、左方向から来ている照明光による影は割合ははっきりしているのに対し、右方向から来る光による影ははっきりしていない。これは右方向の照明光には拡散板を入れているからである。また、物体表面の影が手前に出来ているのは、照明光が少し後方から当たっているからである。振幅ホログラムの再生像は中央部のカメラC.によるもの

白色光



赤
(627nm)



緑
(528nm)



青
(468.5nm)



図5 白色光点光源による再生像

白色光とした像が流れているように見えるのは再生波長により再生像の位置が変わるためで実際は虹色に見える。赤・緑・青としたものは各波長に透過中心を持つ干渉フィルターによる再生像の写真である。

ははっきりしているが、両側の再生像はかなり暗くなっている。この再生像の写真は3方向を同一露出によったのではなく、なるべく良いものを選んで載せてあるが、それでも再生像が暗くなってしまった。左側のカメラL.では少し暗くて分かりにくい、右側のカメラR.の再生像と物体とを比較してみるとその再現性の良さが分かる。ただカメラC.の再生像のピントが小さい人形に合っている、大きい方の人形が少しぼやけている。中央のカメラC.の再生像の場合は物体とほとんど区別がつかない程である。

漂白によって得られた位相ホログラムの再生像も載せたが、参照光以外の光が完全には遮断されていなかったこともあり、いくつかの薄い再生像が重なってしまった。

更に振幅ホログラム面の濃度分布が一様になっていないことが、漂白した後も影響して像の明るさにバラツキが生じた。

さて、この 90° ホログラフィにおいては物体とホログラム面と参照光源の位置関係が、ホログラム上の場所により少しずつ異なっている。ホログラム面の曲率中心に物体が置いてあるので、中心線上では物体光の球面波とホログラム面がほぼ一致するとみられる。これに垂直な方向では、ホログラム面と物体との距離 30 cm でホログラムの高さが 7 cm 程であるから、物体中心に対してホログラムが張る角は 13° 程である。一方、参照光はホログラム面の曲率中心の 2 倍の 60 cm 位置から来る球面波で、その中心線はホログラム面の中央位置に当たる。ただし、ホログラム面の法線とこの中心線とは 10° 程下に傾いている。ホログラムの中心つまりカメラ C. の視野中心にあたる場所では、物体光と参照光のなす角 α はホログラム面の傾きにあたる 10° と同じ値となる。この時 β の値は α の 2 分の 1 であるから 5° の値である。カメラ L. および R. の視野中心にあたる所では、参照光はホログラム面の水平面に対しおよそ 25° の角で入射して来る。ホログラム面の法線は水平面との傾き 10° を持つから、参照光はホログラム面の法線に対しおよそ 27° 程の角で入射して来ることになる。したがってここでの物体光と参照光のなす角 α は 27° 程で β の値は 13° 程になる。よって、ホログラム面の中央部と両端部での格子定数がそれぞれ 270本/mm と 550本/mm 以上となり、撮影条件やフィルムの現像条件の少しの違いが両端部での像の悪化を起すと思われる。

図 5 にはジルコンランプの白色光点光源によるホログラム中央部での再生像を示す。白色光点光源を使うことにより、各波長でのホログラム面上の干渉縞による回折方向が異なって来ることから、虹色を呈した再生像が得られるが、このままでは像の重なりが生じて流れたような写真となっている。これをホログラムの撮影時に近い 633 nm 付近に透過中心波長 627 nm を持つ干渉フィルターを通した赤い光で再生すると、先の図 4 に示した再

生像に近い像が得られる。干渉フィルターを通過する波長がレーザー光程鋭くないので、像が少し流れたようになっている。更に緑および青色を通す干渉フィルターの像も示したが、この写真から波長が短くなると再生像が縮小されることが示された。ここで使った干渉フィルターの半値幅は表 2 に示されているように 16~18 nm 程であるが、この程度でも再生像が比較的是っきり示された。

要 約

フレネルホログラフィにおいて物体を広い範囲で捕えることの出来るようにするため、ホログラムを物体の周囲に 90° 程取り巻くように作成した。ホログラム作成にあたり参照光と物体光の方向が重なると、ホログラムの再生の時全体が明るくなってしまい、物体が背景に沈んでしまうので、参照光は物体光に邪魔にならない程度に離す必要がある。一方参照光と物体光があまり離れることはホログラム上の干渉縞が密になり、ホログラム作成時の条件が厳しくなり、使用するフィルムも制限されてくる。

ここでは 90° ホログラフィの参照光として物体の後方で物体よりほんの少し、再生像と参照光が重ならない程度に、離してホログラムを作成しその再生像を調べた。ホログラムの中央部における再生像はかなり良い結果を得たが、両端では必ずしも満足のいくものではなく、いくつかの問題点が生じた。加えて、漂白した位相ホログラムや干渉フィルターによる再生像も調べたところ、ある程度良い結果を得た。

文 献

- 1) D. Gabor : Nature **161**, 777 (1948)
- 2) E. N. Leith and J. Upatneks : J. Opt. Soc. Amer. **52**, 1123 (1962)
- 3) K. S. Pennington and J. S. Harper : Appl. Optics **9**, 1643 (1970)
- 4) 笹井明 : 特殊写真処方集, 写真工業出版社, 東京 (1973) p. 43