

研究

ディスプレイ・ホログラフィのセンシトメトリー 透過型ホログラムについて

三位 信夫・内山めぐみ・丸山 彰久・風見 豊・酒井 朋子

千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1987年4月7日受理)

Sensitometry for Display Holography On Transmission Holograms

Nobuo MII, Megumi UCHIYAMA, Akihisa MARUYAMA,
Yutaka KAZAMI and Tomoko SAKAI

Department of Image Science and Engineering,
Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

The sensitometric method to determine the exposure required to produce a good display transmission hologram was considered. From the relationship of the density on the characteristic curve corresponding to the exposure against the diffraction efficiency and/or against the signal-to-noise ratio of amplitude holograms, the density at which the diffraction efficiency and the signal-to-noise ratio were the closest to each peak value was found to be about 0.65 above the general fog density. When these amplitude holograms were bleached into phase holograms, the density on the characteristic curve corresponding to the exposure which produced high diffraction efficiency increased significantly, but that which produced high signal-to-noise ratio was about 0.60 above the general fog density. These results suggest that the holographic exposure index to make a clear transmission hologram can be determined on the basis of the exposure E in $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ for the density of 0.65 above the general fog density on the characteristic curve and may be defined as $1000/E$.

1. ま え が き

最近、ホログラフィックディスプレイが、医学用、理工学用、産業用そしてアートや広告媒体として注目されている。ディスプレイ用ホログラムは、再生像が明るくコントラストの高いことが要求されるので、その画質は、回折効率とSN比によって評価できる。感度が高いことと簡便さの点で有利な銀塩感光材料を用いて、画質のよい、つまり高い回折効率とSN比をもったディスプレイ用ホログラムを作るには、感光材料と現像処理液、現像処理条件の組合せによって決まる適正露光量で記録する必要がある。ところがこの適正露光量は、ほとんどの場合、試行錯誤で求めているのが現状である。

1969年に Biedermann らは、薄い振幅型ホログラム

の場合、記録した干渉縞の平均濃度が0.7~0.8になるように現像すると、高い回折効率が得られることを報告した¹⁾。感光材料の取扱い法からすると、適当に現像してある一定の平均濃度に仕上げるという方法は、過去には試みられた時代もあるが、感光材料の特性が安定し、現像処理が化学的、機械的、写真的に管理できる今日、あまり良い方法とは言えない。写真の分野では、かなり昔から写真センシトメトリーという方法によって、感光材料と現像液、現像条件によって決まる実行感度を求め、これをもとに、写真撮影時の被写体への入射光強度や被写体からの平均反射光強度から適正露光量を決める方法がとられている。

本報では、この写真センシトメトリーを応用して、ホログラムを記録する際の物体光と参照光の強度から適正

露光量を求める方法について、検討した結果を報告する。

2. 実験方法

感光材料: Kodak 131-01 と Agfa-Gevaert Holotest 10E75 の2種の乾板を使用した。

記録: フジノン FH-40 ホログラフィックカメラ (He-Ne レーザー付, 参照光入射は 45°) を用いて, Fig. 1 に示す記録光学系⁴⁾で, 中空完全拡散反射板をビームバランス比 3 にて露光量を変えて記録した。

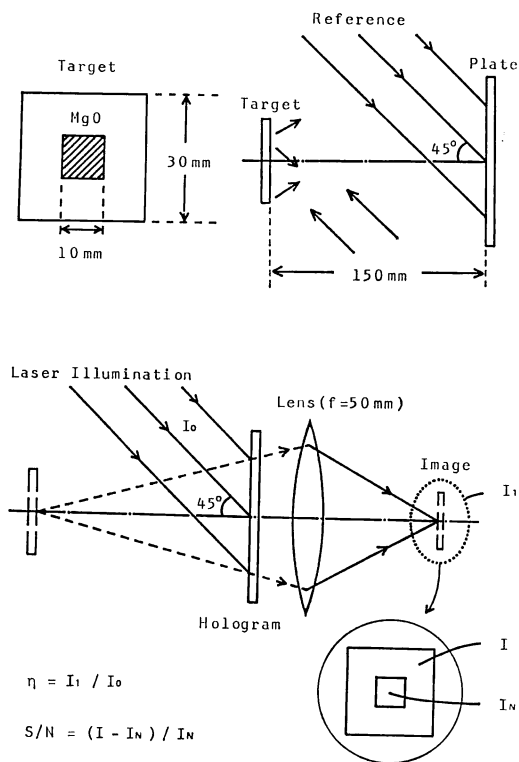


Fig. 1 Optical arrangements for recording holograms (top) and for measuring their diffraction efficiency (η) and S/N (bottom).

Table 1 Formula of monobath.

Sodium sulfite, desiccated	40.0 g
Sodium carbonate, desiccated	25.6 g
N-methyl-p-aminophenol sulfate	1.0 g
Hydroquinone	5.0 g
Potassium bromide	2.0 g
Potassium iodide	0.5 g
Sodium thiosulfate, crystalline	7.0-11.0 g
Water to make	1000 ml

振幅型ホログラムの現像処理: 標準的な Kodak D-19 現像液²⁾ (20°C), 高鮮鋭度タイプの Beutler 氏現像液²⁾ (18°C), 亜硫酸塩をまったく含まない PAAP 現像液³⁾ (20°C), Table 1 に示すモノバス (30°C) の4種のタイプのまったく異なる現像液を用いて時間を変えて (Table 2 を参照) 現像したのち, 停止 (Kodak SB-1²⁾ にて 20°C, 1 min), 定着 (Kodak F-5²⁾ にて 20°C, 8 min) した (ただしモノバスの場合にはハイポ添加量を変化させ, 現像・定着が完了するまで処理した)。つづいてリンス (流水にて 1 min), 水洗促進浴 (2.5% Na₂SO₃-NaHSO₃ 溶液にて 20°C, 2 min), 水洗 (流水にて 5 min) して自然乾燥した。

位相型ホログラムへの変換: 上記のように仕上げた振幅型ホログラムを, 臭素ガス (室温) で 30 min 漂白後 1 昼夜放置, あるいは水洗 (5 min) 後ヨウ素アルコール溶液 (ヨウ素 4 g, エチルアルコール 800 ml, 水 200 ml) で 20°C, 5 min 漂白後流水水洗 (30 min) して自然乾燥した。

回折効率と SN 比の測定⁴⁾: 回折効率 (η) は, Fig. 1 に示す再生光学系で測定した再生照明光強度 I_0 と 1 次回折光強度 I_1 より, 次式で求めた。

$$\eta = I_1 / I_0$$

また SN 比は, 中空完全拡散反射板の再生像 (レンズで 1/2.5 に結像) の反射面部分の光強度 I と中空部分の光強度 I_N を直径 1 mm のピンホールで光電測光することにより, 次式で求めた。

$$S/N = (I - I_N) / I_N$$

センシトメトリー: He-Ne レーザー光をレンズと空間フィルタで均一に拡げてステップウェッジを通して乾板に露光を与え, 振幅型ホログラムと同じ条件で現像処理した後, 同じレーザー光で平行光濃度を測定した。また写真濃度計 (さくら濃度計 PDA-65) の利用も試みた。

3. 振幅型ホログラムのための感度測定点

ホログラムの回折効率は, 干渉縞の平均露光量と空間周波数およびコントラストを表わす visibility の関数となる^{5,6)} ので, 感光材料, 記録光学系, 現像処理条件を固定した場合の回折効率は, 干渉縞の平均露光量の関数となる。またノイズには, 感光材料の乳剤層やベースの散乱ノイズ, 感光材料の特性曲線の非線形ノイズ, 拡散物体である被写体の各点間の相互変調ノイズなどがある⁷⁾ が, 感光材料, 記録光学系, 現像処理条件を固定すると, 非線形ノイズと相互変調ノイズが主となるので,

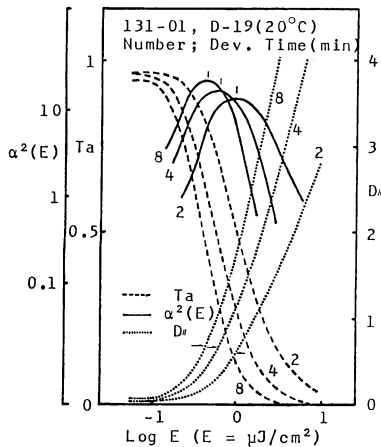


Fig. 2 Specular amplitude transmittance (T_a), gradient of T_a -Log E curve squared ($\alpha^2(E)$) and specular density (D_n) plotted vs Log E ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$).

SN 比もまた干渉縞の平均露光量の関数となる。

Biedermann らは、薄い振幅型ホログラムの回折効率 η は、次式で表わされることを示した¹⁾。

$$\eta = \{(1/2) \cdot \log e \cdot \alpha(E) \cdot P(\nu) \cdot M(\nu)\}^2$$

ここで $\alpha(E)$ は対数露光量-振幅透過率曲線の勾配、 $P(\nu)$ は入力変調、 $M(\nu)$ は感光材料の MTF である。これによると、感光材料、記録光学系、現像処理条件を固定した場合の回折効率のピークは、 $\alpha^2(E)$ が最大となる露光量のところにくることになる。乾板と現像条件の各組合せにおけるセンシトメリーの結果から、 $\alpha^2(E)$ の最大値は、Fig. 2 に例示するように、いずれも特性曲線のカブリ濃度+ベース濃度から上の正味の平行光濃度値が 0.5~0.7 (以後カブリ上 0.5~0.7 の平行光濃度と略し、図では Net D_n と示す) のところにくるのが認められた。同一乾板・現像液・現像時間ごとに露光量を変えて記録した振幅型ホログラムの回折効率、SN 比と、そのそれぞれの露光量から特性曲線上で求めた平行光濃度の関係は、Fig. 3 に例示するようになり、回折効率、SN 比のピークは、いずれも特性曲線のカブリ上 0.5~0.8 の平行光濃度のところに来た。

センシトメリーの際の感度測定点の濃度は、取扱い上あまり細かな値でないほうが良いので、0.05 刻みで平行光濃度をとることにした。まず同一乾板・現像液・現像時間ごとに露光量を変えて記録した振幅型ホログラムの回折効率、SN 比と、そのそれぞれの露光量から特性曲線上で求めた平行光濃度の関係グラフより (つまり Fig. 3 のように求まった各曲線 1 本ごとに)、0.05 刻みでとった各平行光濃度に対応する露光量のホログラム

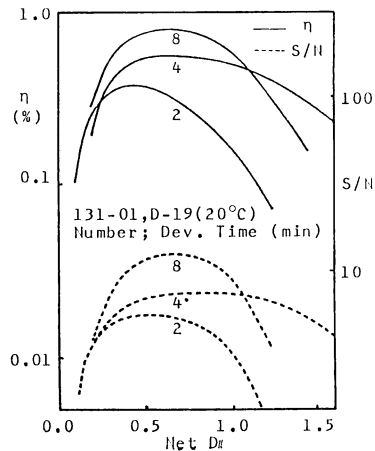


Fig. 3 Diffraction efficiency and S/N of amplitude holograms vs net specular density.

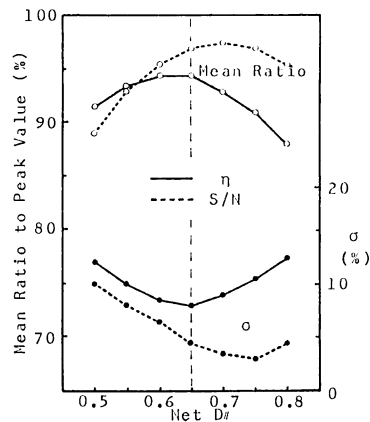


Fig. 4 Mean ratio to each peak value of diffraction efficiency and S/N of amplitude holograms and their standard deviation (σ) plotted vs net specular density.

の回折効率、SN 比が、それぞれのピークの値の何%になるかを求めた。こうして求めた乾板、現像液、現像時間の異なる 21 組 (Table 2 を参照) のデータを、0.05 刻みでとった各平行光濃度ごとに全平均値とその標準偏差 (σ) を求めてグラフにしたものが、Fig. 4 である。これをみると、特性曲線のカブリ上 0.65 の平行光濃度のところに、回折効率、SN 比ともにピーク値に最も近い値がくるのが認められる。したがって振幅型ホログラムの場合、特性曲線のカブリ上 0.65 の平行光濃度のところを感度測定点にとるとよいことがわかった。

4. 位相型ホログラムのための感度測定点

振幅型ホログラムを漂白して位相型ホログラムに変換

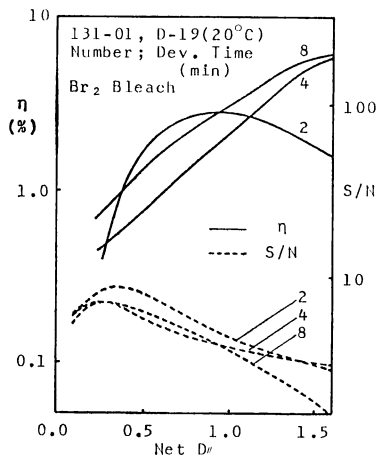


Fig. 5 Diffraction efficiency and S/N of phase holograms plotted vs net specular density.

すると、Fig. 5 に例示するように、いずれも S/N 比はあまり変化しないが、回折効率約 1 桁向上してそのピークが高露光部へシフトした。振幅型ホログラムの場合と同様に、同一乾板・現像条件・漂白方法ごとに 0.05 刻みでとった各平行光濃度に対応する露光量のホログラムの回折効率、 S/N 比が、それぞれのピーク値の何%になるかを求め、得られた 42 組（漂白法を 2 通り用いたので振幅型ホログラムの場合の 2 倍）のデータを 0.05 刻みでとった各平行光濃度ごとにその全平均値と標準偏差を求めたものが、Fig. 6 である。これを見ると、 S/N 比は、特性曲線のカブリ上 0.60 の平行光濃度のところにピーク値に最も近い値がくるが、回折効率は、かなり高い平行光濃度のところにピーク値に最も近い値がくるのが認められる。位相型ホログラムは、回折効率そのもの

のが比較的高い（漂白前の振幅型ホログラムより 1 桁高い）ので、 S/N 比を重視した上で回折効率にも配慮すると、振幅型ホログラムの場合と同様に、特性曲線のカブリ上 0.65 の平行光濃度のところを感度測定点にとるとよいと結論される。この感度測定点は、漂白前の振幅型ホログラムと同程度の S/N 比を維持しながら、これよりも数倍高い回折効率を有する位相型ホログラムを得るためのものである。

5. ホログラフィ露光指数の表示法

ホログラフィ露光指数 (HEI) は、振幅型ホログラム、位相型ホログラムを問わず、特性曲線のカブリ上

Table 2 Holographic exposure index (HEI) determined.

Developer	Development time or hypo content	HEI	
		Kodak 131-01	Agfa 10E75
D-19 (20°C)	2 min	930	250
	4 min	1600	460
	8 min	2300	760
Beutler (18°C)	4 min	1150	370
	8 min	2200	690
	12 min	3400	980
PAAP (20°C)	2 min	260	125
	4 min	660	160
	8 min	1200	270
Monobath (30°C)	7 g/l	—	990
	9 g/l	—	930
	11 g/l	—	830

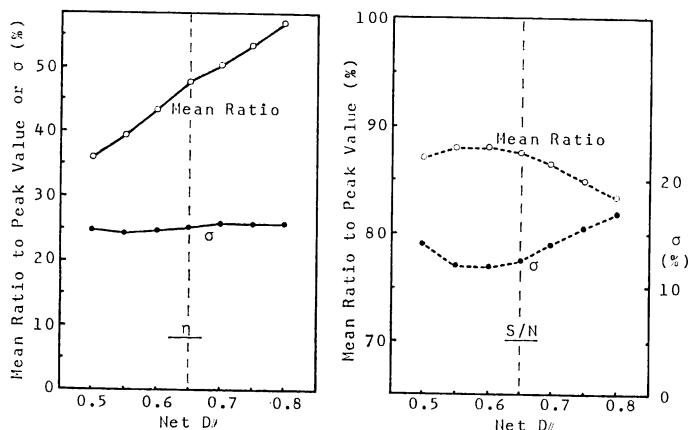


Fig. 6 Mean ratio to each peak value of diffraction efficiency and S/N of phase holograms and their standard deviation plotted vs net specular density.

0.65の平行光濃度に対応する露光量 E (単位は $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) より、つぎのように表示するとよいと考える。すなわち

$$HEI = 1000/E$$

これによって求めた、実験に用いた乾板と現像条件の各組合せにおけるホログラフィ露光指数は、Table 2 に示すごとくである。ホログラムの記録の際には、参照光と物体光の強度の和 I_E (単位は mW/cm^2) を測り、これに HEI を掛けてその逆数をとると適正露光時間 t (単位は s) が求まる。すなわち

$$t = 1/(HEI \times I_E)$$

6. 現像時間の選択

乾板と現像液の各組合せにおいて、現像時間と回折効率、SN 比のピーク値の関係を調べたところ、Fig. 7, 8 に例示するようになった。すなわち、回折効率のピーク

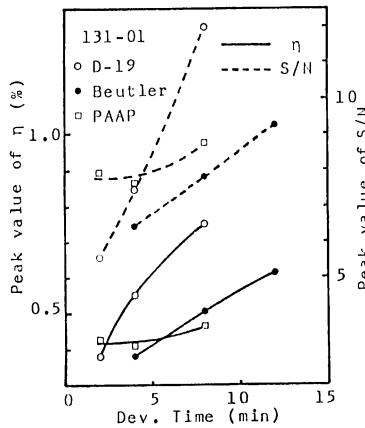


Fig. 7 Relation between development time and diffraction efficiency or S/N of amplitude holograms.

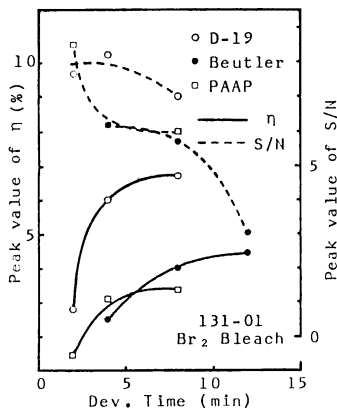


Fig. 8 Relation between development time and diffraction efficiency or S/N of phase holograms.

値は、振幅型ホログラム、位相型ホログラムともに現像時間が長めのほうが高く、SN 比のピーク値は、振幅型ホログラムでは現像時間が長めのほうが高く、位相型ホログラムでは現像時間が短めのほうが高い傾向が認められた。したがって、ノイズの少ない振幅型ホログラムの場合には、カブリが目立たない範囲内で長めの現像時間を選び、回折効率そのものが比較的高い位相型ホログラムの場合には、SN 比が高いのみでなくノイズも少ない、短めの現像時間を選ぶとよいことがわかった。

7. 写真濃度計による濃度測定

センチメートルの際のレーザー光による平行光濃度の測定は、非常に手間がかかって面倒である。ホログラフィ用感光材料は、超微粒子であることから、得られる銀画像のキャリエ係数(平行光濃度と拡散光濃度の比)がほぼ1と考えられ、画像銀の色調もニュートラルに近い。そこで、市販の写真濃度計(さくら濃度計 PDA-65)の使用による濃度測定の簡略化を試みた結果、Table 3 に示すように、いずれの乾板と現像条件の組合せにおいても、レーザー光(633 nm)による平行光濃度と写真濃度計により赤フィルター(さくら濃度計 PDA-65 に内蔵されている 644 nm を透過する $\Delta\lambda \approx 10 \text{ nm}$ の干渉フィルター)透過光を用いた拡散光濃度とがほぼ等しくなり、濃度測定に写真濃度計を使用してもまったく問題のないことがわかった。

Table 3 Ratio of 633 nm specular to 644 nm diffuse density ($D_{H(633)}/D_{H(644)}$).

Developer	Development time or Hypo content	$(D_{H(633)}/D_{H(644)})$	
		Kodak 131-01	Agfa 10 E 75
D-19 (20°C)	2 min	1.03	1.00
	4 min	0.92	0.97
	8 min	0.99	0.97
Beutler (18°C)	4 min	0.97	1.02
	8 min	1.00	1.03
	12 min	1.02	1.09
PAAP (20°C)	2 min	1.08	0.97
	4 min	1.00	1.00
	8 min	0.98	1.02
Monobath (30°C)	7 g/l	—	1.05
	9 g/l	—	0.96
	11 g/l	—	0.98
		$\bar{x} = 1.00$	$\sigma = 0.04$

8. ま と め

画質とくに SN 比のよいディスプレイ用ホログラムを得るには、振幅型、位相型を問わず、レーザーを光源としたセンシトメトリーによって得られた特性曲線のカブリ上 0.65 の写真濃度 (レーザー光の色に近い干渉フィルター透過光を用いた拡散光濃度) に対応する露光量 E (単位 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$) より、ホログラフィ露光指数 $HEI=1000/E$ で表示するとよいと結論された。ただし、相反則不軌に注意し、センシトメトリーの露光 (感光材料への入射光強度、露光時間) は、できるだけホログラムの記録条件に近い条件下で行なう必要がある。ホログラムの記録の際には、参照光と物体光の強度の和 I (単位は mW/cm^2) を測り、これに HEI を掛けて逆数をとると適正露光時間 t (単位は s) が求まる。

このセンシトメトリー法は、一般の透過型ホログラム用であって、生じる干渉縞の格子間隔が極端に小さいリップマンホログラムの場合には適用できない。リップマンホログラム用については、次報で報告する。

おわりに、フジノン FH-40 ホログラフィックカメラをお貸し下さった富士写真光機(株)鈴木正根部長に心から謝意を表します。

文 献

- 1) K. Biedermann and K. A. Stetson: "Adjusting development time to influence the characteristics of holograms," *Photogr. Sci. Eng.*, **13** (1969) 361-370.
- 2) 笹井 明: 最新写真処方便覧 (写真工業出版社, 東京, 1983).
- 3) S. A. Benton: "Photographic handling," *Handbook of Optical Holography*, ed. H. J. Caulfield (Academic Press, New York, 1979) p. 358.
- 4) 久保田敏弘: "拡散物体に対するホログラムの回折効率とノイズの測定について", *Hodic Circ.*, No. 1 (1981) 5-8 (文献7) の p. 81 参照).
- 5) 辻内順平, ほか: 第 16 回応用物理関係連合学会講演予稿集 4 (1969) p. 43.
- 6) 大上進吾: "ホログラフィ用感光材料", *応用物理*, **38** (1969) 883-885.
- 7) 池上皓治: "ホログラム記録用銀塩感光材料の種類と現像・漂白処理方法 (1)", *O plus E*, No. 19 (1981) 79-86.