

研究

リップマンカラー ホログラムの色再現と 記録・保存への応用

久保田 敏弘

京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

(1988年9月28日受理)

Color Reproduction and Application to Recording and Preservation of Lippmann Color Hologram

Toshihiro KUBOTA

Department of Electronics and Information Science, Kyoto Institute of Technology,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606

One of the most important application of color holography is the recording and preservation of cultural inheritance and medical specimen. To realize this, the analysis of the color reproduction of the hologram is necessary together with the discussion for obtaining the bright image. In this paper, the process of the color reproduction is discussed and the colors of the reconstructed image, as well as those of the original color charts are represented using the chromaticity diagram for the first report of the color reproduction of the Lippmann color hologram. The system for recording the color hologram is also discussed briefly.

1. はじめに

ホログラフィの究極の目的の一つは、眞のカラー三次元像を得ることである。カラー ホログラムは原理的には三原色に相当する三つのレーザー光で三つのホログラムを記録することによって得られ、加法混色によりカラー像が再生される。

最近のホログラフィ用記録材料の開発とその処理法の進歩により、きわめて明るい再生像が得られるようになり、カラー ホログラムについても満足できる像が得られる段階となりつつある。これに伴い、ホログラムを単なるディスプレイの手段だけでなく高度に利用できる可能性が開けてきた。その一つがカラー ホログラムによる文化財および医学標本の記録・保存である。これらの応用に関しては、再生像は元の被写体の色をできる限り忠実に再現するものでなければならない。写真法とは異なり、ホログラフィでは三つの単色光で記録し、また白色光で再生する際ホログラム自身が特有の波長選択性を示す。したがってホログラムから再生される像の色は、広

い発光波長分布をもつ光源で照明された被写体の色と異なることが予想される。

白色光再生可能なリップマン ホログラムの色再現に関してはいくつかの報告がある。四つのレーザー光を用いて記録された透過物体のカラー ホログラムについて、元の被写体と再生像の色の比較を行なった例¹⁾、また単一の記録波長で擬似カラーを得る手法によりホログラムを記録し、そのとき再現される色の検討を行なった例²⁾など、いずれも実験によって得られる波長選択性を基に解析している。本研究は上述した応用を目的として、リップマンカラー ホログラムの色再現と記録方式について解析するもので、色再現過程の検討と再現される色の評価をCIE表色系に基づいて行ない、さらにホログラムによる色再現の限界と最適な色再現を得るために条件を見いだそうとするものである。その第一段階として本報告では、ホログラムの色再現過程の検討といくつかの被写体に対する色再現のシミュレーションを行なう。また、カラー ホログラムに適した記録方式についても簡単にふれる。

2. 色再現の過程

リップカラーマンホログラムの色再現の過程は Fig. 1 のようになる。①は照明光源に関するものである。ホログラムは三原色に相当する三つの波長 λ_r , λ_g , λ_b の光によって記録されるものとする。このホログラムは分光エネルギー分布 $E_2(\lambda)$ の照明光源で再生される。一方、被写体は $E_1(\lambda)$ の分光エネルギー分布をもつ光源で照明されるものとする。いくつかの照明光源、すなわち CIE 標準光源 B, C および色温度 3400 K のハロゲンランプの分光エネルギー分布が図示されている。②は記録しようとしている被写体に関するものである。CIE 表色系に基づいて、被写体の分光反射率 $R(\lambda)$ から⑧のように X_1 , Y_1 , Z_1 が求められる。ただし、規準化の係数は 1 とした。これが被写体を眼で直接観察するときの 3 刺激値である。 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} は CIE 標準観測者の等色関数である。積分範囲は可視波長域とする。

④は被写体を波長 λ_r , λ_g , λ_b のレーザー光で照明し、ホログラムを記録したときの回折効率の波長依存性（波長選択性）である。それぞれの記録波長に対するホログラムの波長選択性曲線の半值幅はホログラムの厚みや回折効率などに依存し、これはまた再生像のぼけの大きさに影響を与える。このホログラムを $E_2(\lambda)$ の分光エネル

ギー分布をもった照明光源で再生すれば、⑤のように再生像の 3 刺激値 X_2 , Y_2 , Z_2 が求められる。

こうして被写体と再生像の 3 刺激値から色再現の評価を行なうことができる。この際、比較の規準としての被写体の色をどう考えるかによって被写体の 3 刺激値が異なり、また色再現の目標をどう設定するかによって評価が違ってくる。ホログラムの記録は、現実には三つのレーザー光を同時に照明するのではなく、順次照明して行なわれる。したがって、被写体の色としてはレーザー光で照明された色としてではなく、ホログラムを再生する際の光源と同じ光源で被写体を照明したとき ($E_1 = E_2$) の色とするのが妥当であると思われる。その意味で測色的色再現³⁾を目標にした評価を行なうものである。

3. 波長選択性

再生像の 3 刺激値を決定する大きな要因はホログラムの波長選択性である。リップマンホログラムの回折効率 η は結合波理論により下式で与えられる^{4,5)}。

$$\eta = \frac{\nu^2}{\nu^2 + (\nu^2 - \xi^2)/\sinh^2(\nu^2 - \xi^2)^{1/2}} \quad (1)$$

ここで、

$$\nu = \frac{i\pi d n T}{\lambda_c V \cos \theta_c \cos \theta_i} \quad (2)$$

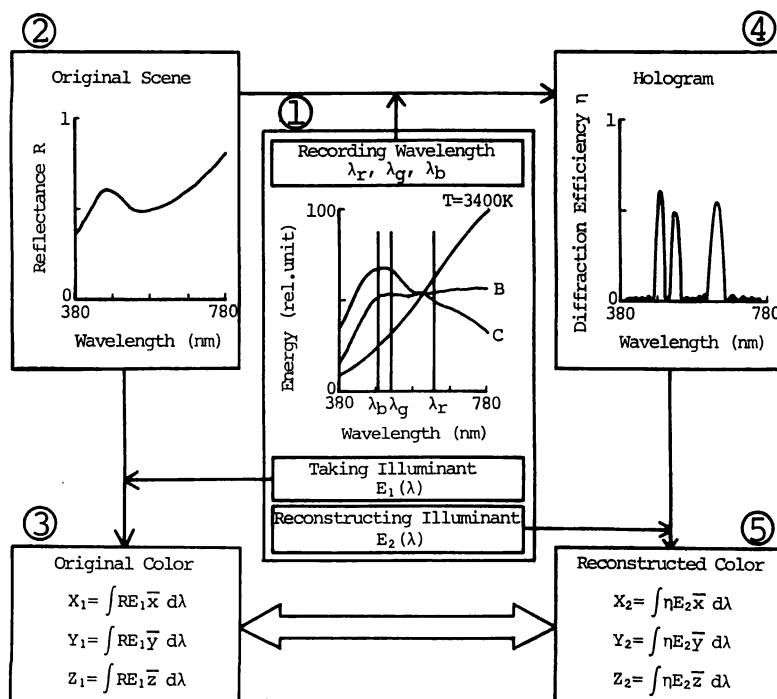


Fig. 1 Process of the color reproduction of the Lippmann color hologram.

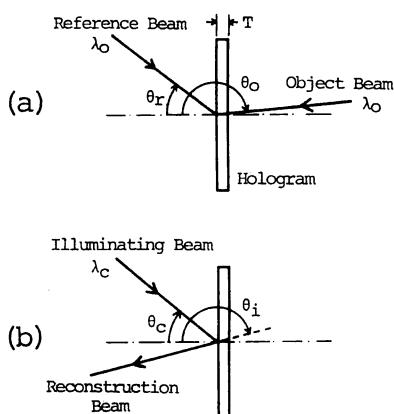


Fig. 2 Geometry for analyzing the wavelength selectivity of the Lippmann hologram. (a) recording, (b) reconstruction.

$$\xi = \pi T \left\{ \frac{n_c(\cos \theta_c - \cos \theta_i)}{\lambda_c} - \frac{n_o(\cos \theta_r - \cos \theta_o)}{\lambda_o} \right\} \quad (3)$$

ただし、ここでは位相ホログラムを考えており、 Δn は干渉縞の屈折率変化の半分の値、 T はホログラムの厚み、 n_o 、 n_c はそれぞれ記録時、再生時のホログラムの平均屈折率である。

ホログラムは Fig. 2(a) に示すように参照光、物体光共に平行光として記録される。記録波長 λ_o は λ_r 、 λ_g 、 λ_b を代表している。再生は (b) のように波長 λ_c の再生照明光を参照光と同じ方向から入射させて行なう。角度の添字 r 、 o 、 c 、 i はそれぞれ参照光、物体光、再生照明光、および再生光を意味する。再生光の方向 θ_i は

$$\frac{n_c(\sin \theta_c - \sin \theta_i)}{\lambda_c} = \frac{n_o(\sin \theta_r - \sin \theta_o)}{\lambda_o} \quad (4)$$

の関係によって与えられる。ただし、ここで扱う角度はホログラム内部での値である。再生は白色光を用いて行なわれる。 η の λ_c 依存性が波長選択性である。この曲線は回折効率が低いときは、ほぼ sinc 関数の 2 乗で変化する。ホログラムの厚みが薄いほど、また参照光の角度が大きいほど波長選択性は悪く、曲線の半値幅は拡がる。したがって、再生像は色の純度が低下すると同時にホログラム面から離れた場合のぼけが大きくなる。半値幅は回折効率の値にも多少依存し、回折効率が高くなるほど拡がる傾向にある。

こうして色再現過程の④におけるホログラムの波長選択性が与えられたことから、色再現の評価を行なうことができる。被写体の連続したゆるやかな分光反射率分布は、ホログラムに記録することにより三つの記録波長でピークをもつ波長選択性の曲線に置き換えられることに

なる。評価は波長 λ_r 、 λ_g 、 λ_b に対するホログラムの回折効率の値を、それらの波長に対する被写体の反射率に等しくなるようにしたとき、再生像の色と被写体の色とを比較することによって行なわれる。

4. 色再現のシミュレーション

現実によく使用される記録光源、記録材料、また再生照明光源の特性を考慮して色再現の評価を行なう。本報告ではいくつかの被写体の色に対して色度座標を求め、再生される色についてのシミュレーションを行なう。記録および再生の条件は以下のように定める。

記録：波長 $\lambda_r = 632.8 \text{ nm}$

$\lambda_g = 514.5 \text{ nm}$

$\lambda_b = 488.0 \text{ nm}$ (または 457.9 nm)

参照光の角度 $\theta_r = 17.9^\circ$ (空気中で 30°)

物体光の角度 $\theta_o = 180^\circ$

記録材料の厚み $T = 7.0 \mu\text{m}$

屈折率 $n_o = 1.63 (=n_c)$

再生：再生照明光の角度 $\theta_c = 17.9^\circ (= \theta_r)$

照明光源はハロゲンランプ (色温度 3400 K)

まず、被写体として分光反射率分布が波長に依存しないような白色の物体を仮定する。それぞれ単一の波長の光で記録されたホログラムおよび三つの波長の光で記録されたカラーホログラムの再生像について、再生される色を xy 色度図上に示したのが Fig. 3 である。ただし、回折効率は 50% とした。また再生に用いるハロゲ

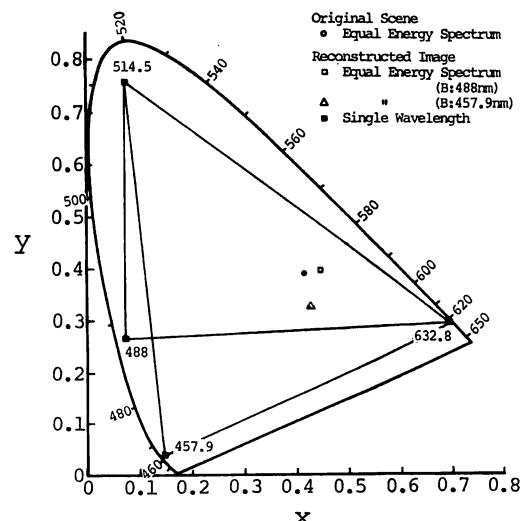


Fig. 3 Illustrating of the color reproduction characteristics of the Lippmann color hologram. The diffraction efficiency of each hologram is 50%.

ソランプの分光エネルギー分布は、絶対温度 3400 K の黒体放射のそれを仮定した。このランプは昼光を表す CIE の標準光源の一つである D_{65} に比べて赤色の成分が多い。ホログラムの厚みが 7 μm の場合、波長選択性の曲線の半値幅は記録波長 488 nm で 12 nm, 632.8 nm で 20 nm 程度であり、単一の波長の光で記録された場合の色の純度は高い。したがって、カラー・ホログラムを記録した場合、とくに青色として 457.9 nm の光を使用すれば再現される色の範囲は広くなりうる。再生像の色に関しては、この例のような白色の被写体に対しては元の色とは異なってしまう。この例では回折効率の値は 50% であるが、回折効率の変化による色度座標の変化は小さい。最も大きく変化する 514.5 nm の場合でも 0.02 以下である。

次に実際の被写体として、紙に 4 種類の色のポスターカラーを塗った試料（カラーチャート）R, Y, G, B を用意した。分光光度計を用いて 45° 前方から単色光で試料を照明し、試料面に垂直方向の反射率を測定した。

Fig. 4 はそれらの分光反射率曲線である。このような反射率をもつ試料を被写体として三つの波長の光でカラー・ホログラムを記録したとすれば、その波長選択性は **Fig. 5** に示すようなものになるはずである。この図においては、試料の反射率も同時に示してある。再生像は眼で観察することにし、この場合の再生像と元の被写体の色を $u'v'$ 色度図上に示したのが **Fig. 6** である。いずれの試料も元の被写体の色に比べて再生像の色は異なっている。三原色の記録波長をどのようにとるかは、それぞれの波長付近に高い反射率をもつ試料に対して、再生成される色に大きな影響を与える。たとえば青の試料 B に対して、記録波長を 488, 457.9 nm のいずれにとるかによって色に大きな差が生じる。この青の試料の場合、眼で識別できる最小色差の範囲を越えており、異な

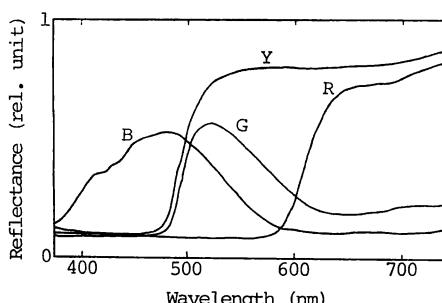


Fig. 4 Spectral reflectance curves of the color chart. R, Y, G and B represent the chart of red, yellow, green and blue color, respectively.

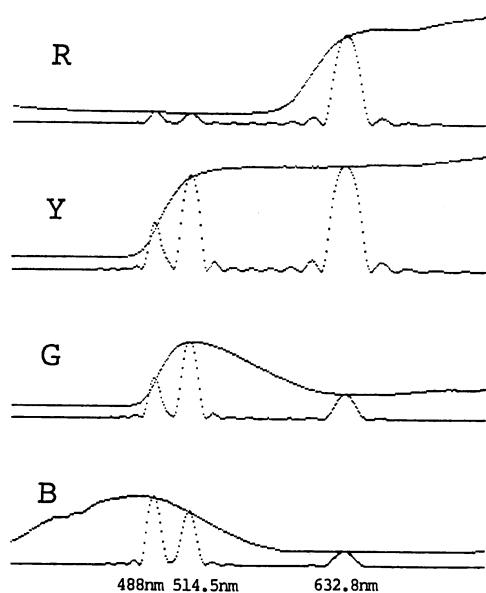


Fig. 5 Wavelength selectivity of the Lippmann color hologram recorded the color chart.

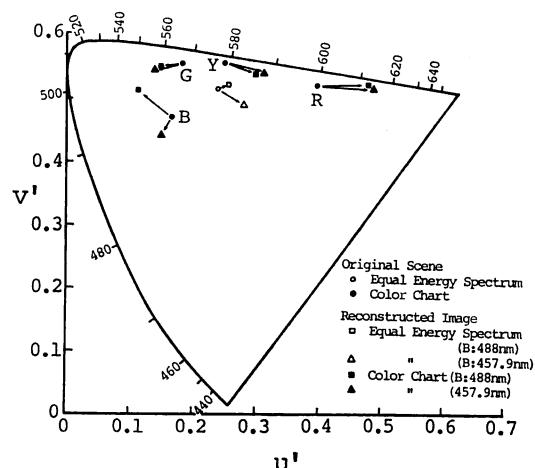


Fig. 6 Illustrating the color reproduction characteristics of the Lippmann color hologram recorded the color chart.

った色として認識される。他の試料の場合、この範囲は越えてはいないが一致はしない。この理由は、連続した被写体の分光反射率分布を三つの記録波長を中心とした狭い反射率をもつ分布で置き換えたことによる。記録波長を増やせば色再現性はよくなるが、現実の問題として多重露光による回折効率の低下が生じる。

カラー・ホログラムは混色の方法からみれば、加色法カラー写真やカラーテレビと同じである。カラー写真ではフィルムの、またテレビでは蛍光体の分光感度分布が色

再現を決める重要な要因である。被写体の分光反射特性に關係なく測色的色再現を実現するためには、被写体の色情報を赤、緑、青色成分に分離して記録するための各分光感度分布の形は一定の条件を満たす必要があり、その形が定量的に解析されている。その条件とは、各分光感度分布が CIE 等色関数の一次結合でなければならぬことである。分光感度分布が CIE 等色関数の一次結合になることを Luther 条件を満たしているという⁶⁾。この場合、三原色を決めれば、測色的色再現を実現するための分光感度分布が一義的に決まるが、ある波長域でこれが負になってしまい、これの実現は容易ではない。

ホログラムの場合、分光感度分布に相当するものは波長選択性である。これはホログラムの厚み、記録波長、参照光と物体の角度、また回折効率に依存し、Fig. 5 に示されるような分布となって、やはり負の領域は存在しない。このような場合、最適な色再現を得るために解を以下のようにして決めるのが一つの方法である。

すなわち、灰色を含めた 20 種類程度の色を試料として選び、これを代表的な色とする。三つの記録波長の組を設定し、これらのすべての試料に対して測色的色再現の立場から元の試料と再生像の 3 刺激値の差

$$F = \sum_{j=1}^N \{(X_{2i} - X_{1i})^2 + (Y_{2i} - Y_{1i})^2 + (Z_{2i} - Z_{1i})^2\} \quad (5)$$

を求める。ただし、 N は試料の数、 X^j 、 Y^j 、 Z^j は j 番目の試料に対する 3 刺激値であり、 i は r, g, b を意味する。記録波長を変えて F を最小にするような組 (λ_r , λ_g , λ_b) を知る。各試料に重みづけをするのも有効である。こうして最適な記録波長の組が求められる。しかし、現実に使用できるレーザー波長は、最適条件から求められる理想的な波長とは一般に一致しない。そこで、三つの波長のうち二つあるいは一つを現実のレーザー波長とし、残りの波長に対して最適条件を求める方法もより現実的な方法として考えられる。

5. 記録方式と色再現

カラーホログラムの記録方式としては、白色光で再生できるリップマンホログラムが最も適している。このホログラムで真のカラー再生像を得るために一つの方法は、三つの記録波長を使っていわゆるオーソドックスなカラーホログラムを記録することである。この場合、被写体がホログラム記録に適したものであれば、再生像は臨場感に満ちたものとなる。しかし、記録波長としては現実のレーザー波長を使用しなければならないことか

ら、理想的な波長との差がこの種のカラー ホログラムの色再現の限界を与える。一方、単一の記録波長を用いても真のカラー再生像を得ることができる⁷⁾。これは擬似カラー ホログラム⁸⁾を得るための方法としては以前から知られているが、ホログラフィックステレオグラムをマスター ホログラムとしてイメージ型のリップマン ホログラムを記録する⁹⁾ことによって真のカラー再生像を得る方法である。記録に赤色のレーザー光を使い、緑、青の成分のホログラムは記録前に適当に膨潤した銀塩乳剤に記録し、再生時に元の厚みにもどせばよい。三つの再生波長が決まれば、これらのホログラムからの再生光がブレッジの条件を満足して、かつ同じ方向になるための膨潤の度合が計算できる。また再生される三つのマスター ホログラムの像を一致させるためには、参照光を平行光とし、記録と再生の波長比で決まる像の角倍率が同じになるように、記録時にあらかじめマスター ホログラムの位置を変えておけばよい。この方法は作製手順は複雑であるが、ホログラフィックステレオグラムの原画は写真法により得られるため被写体に制限はなく、文化財、医学標本などの記録に適している。赤色用の銀塩乳剤に 3 重露光することになるが、再生像の明るさに関しては緑・青用の乳剤に 2 重露光するオーソドックスな方法に比べて優れている。さらに、コンピューターを介して原画を作製することにより被写体の特徴を抽出でき、また架空の物体の 3 次元像も得られる特長をもつ。

この方法に基づけば、記録前の銀塩乳剤の厚みをコントロールすることにより赤色も含めた三つの再生波長を任意に選ぶことができるため、(5)式により求められる最適な色再現を実現することができる。

6. おわりに

文化財および医学標本の記録・保存を目的として、リップマンカラー ホログラムの色再現について解析した。その第一報として色再現の過程を検討し、被写体としていくつかのカラー チャートを用いたとき再現される色についてシミュレーションを行ない、それを元の被写体の色と比較した。また、カラーホログラムに適した記録方式について簡単にふれた。一般的の被写体は連続した分光反射率分布をもっている。これを三原色のレーザー光でホログラムに記録すれば、連続した分光反射率分布を波長選択性によって決まる分光反射率分布に置き換えることになる。したがって、元の被写体の色と再生像の色は一般に異なり、その差は使用する記録波長に依存する。最適な色再現は測色的色再現の考え方に基づいて解析でき

る。この解析と、望ましいリップマンカラーホログラムの記録方式についての詳しい報告は別の機会に行なう。

文 献

- 1) M. Noguchi: "Color reproduction by multicolor holograms with white-light reconstruction," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 496-499.
2) S. L. Smith: "Application of the tri-color theory of additive color mixing to the full color reflection hologram," *Proc. SPIE*, **523** (1985) 42-46.
3) R. W. G. Hunt: "Objectives in colour reproduction," *J. Phot. Sci.*, **18** (1970) 205-215.
4) H. Kogelnik: "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Syst. Tech. J.*, **48** (1969) 2909-2947.
5) T. Kubota: "Characteristics of thick hologram grating recorded in absorptive medium," *Opt. Acta*, **25** (1978) 1035-1053.
6) 大田 登: "写真における色再現", 色の性質と技術, 応用物理学会光学懇話会編 (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 153-155.
7) 久保田敏弘, 石田由佳: "再生波長の制御とカラーホログラフィ", 第49回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 第3分冊 (1988) p. 720.
8) M. M. Crenshaw: "Pseudo-color reflection holography—an artistic perspective," *Proc. SPIE*, **747** (1987) 104-107.
9) T. Kubota and T. Ose: "New technique for recording a Lippmann hologram," *Opt. Commun.*, **28** (1979) 159-162.