

单波长记录二维真彩色全息图的一种新方法

王 辉 唐继跃

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

郭履容

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

摘 要 提出一种方法: 用新型的光学元件——三通道光纤面板作为分色与合成元件, 使得单波长真彩色全息图的制作大为简化, 而且能够提高全息图再现像的亮度和色饱和度。

关键词 光纤面板, 真彩色全息图。

利用单一波长的激光记录真彩色全息图的工作近年来不断有所报道^[1~5]。这些方法不仅设备简单, 更重要的是便于制版进行全息图的模压复制。它们的共同点是先制作原彩色图像的三个黑白分色片, 然后用彩虹全息方法或像面全息法, 利用同一波长的光, 分三次曝光将三分色片的全息图记录于同一干板上。对每一个全息图, 使其记录时狭缝位置或参考光入射角按一定规律发生变化, 利用白光再现, 就可综合出真彩色像。在记录过程中必须使三个分色片精确对位, 给这一技术带来了难度。另外由于三幅全息图叠合在一起, 将会使其再现像的亮度和色饱和度下降。本文提出使用三通道光纤面板^[6]作为分色与合成元件拍摄全息图, 使得单波长彩色全息图的制作大大简化。由于这种分色与合成的特殊性, 将可提高再现像的亮度和色饱和度。本文给出了这一新的拍摄方法原理和实验结果。

1 三原色通道光纤面板分色原理

与所有的单波长记录二维彩色全息图方法一样, 首先必须对要记录的彩色图进行分色, 通常的方法是对三分色像加网, 或采用电子分色法, 分色加网一次完成^[5]。这些方法过程较为复杂, 分色设备昂贵以及在拍摄全息图时需要精密的对位装置, 而且加网法并不能彻底解决因三分色像全息图重叠而引起的亮度下降和色饱和度低的问题。三通道光纤面板是一种新型的图像分解与合成元件, 它的两个端面分别称作集合端和分区端。从面板的集合端(设为 P_1 端)输入一幅图像时, 从面板的分区端(设为 P_2 端)将输出三幅图像, 当将面板逆向使用时, 又可将三幅图像合成一幅图像^[6]。构成光纤面板 P_1 端和 P_2 端的每根光纤端头可以看作是一系列取样点, 在 P_1 端取样函数为:

$$\begin{aligned}
 P_1(x, y) &= \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M \delta(x + 2d - 3nd, y - md) + \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M \delta(x + d - 3nd, y - md) \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M \delta(x - 3nd, y - md) \\
 &= P_{11}(x, y) + P_{12}(x, y) + P_{13}(x, y)
 \end{aligned} \tag{1}$$

上式表示在空间“套合”的三组取样方阵，每组在 x 方向取样间隔为 $3d$ ，在 y 方向取样间隔为 d 。每两组间依次在 x 方向位移 d 。光纤总数为 $N \times M$ 。 P_2 端取样函数为：

$$\begin{aligned}
 P_2(x, y) &= \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M \delta(x - nd, y - md) + \sum_{n=N/3+1}^{2N/3} \sum_{m=1}^M \delta(x - nd, y - md) \\
 &\quad + \sum_{n=2N/3+1}^N \sum_{m=1}^M \delta(x - nd, y - md) \\
 &= P_{21}(x, y) + P_{22}(x, y) + P_{23}(x, y)
 \end{aligned} \tag{2}$$

上式表示在空间分离的三个取样阵列。本文所设计的光纤面板使得(1)式和(2)式之间的传输关系为：

$$\left. \begin{aligned}
 P_{21}(x, y) &= T[P_{11}(x, y)] = P_{11}(3x - 2d, y), \\
 P_{22}(x, y) &= T[P_{12}(x, y)] = P_{12}[3(x - Nd/3) - d, y], \\
 P_{23}(x, y) &= T[P_{13}(x, y)] = P_{13}[3(x - 2Nd/3), y],
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

即 P_1 端的三组取样点 $P_{11}(x, y)$, $P_{12}(x, y)$, $P_{13}(x, y)$ 经面板传输后(用符号“ T ”表示传输过程)，在 P_2 端输出的分布分别对应样点函数 $P_{21}(x, y)$, $P_{22}(x, y)$ 和 $P_{23}(x, y)$ 。由于光纤光传输的可逆性，(3)式的逆变换也成立：

$$\left. \begin{aligned}
 P_{11}(x, y) &= T^{-1}[P_{21}(x, y)] = P_{21}\left(\frac{x + 2d}{3}, y\right), \\
 P_{12}(x, y) &= T^{-1}[P_{22}(x, y)] = P_{22}\left(\frac{x + Nd + d}{3}, y\right), \\
 P_{13}(x, y) &= T^{-1}[P_{23}(x, y)] = P_{23}\left(\frac{x + 2Nd}{3}, y\right),
 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

利用三通道光纤面板获得三分色像原理是在面板的 P_2 端三个区域分别加上红，绿，蓝三原色滤片，将待分解的彩色透明片帖于面板的 P_1 端。用白光照明 P_1 端(见图 1)，由 P_1 端取样，得到的样点分布为：

$$I_1(x, y) = \begin{pmatrix} I_0 f[C, (x, y)] P_{11}(x, y) \\ I_0 f[C, (x, y)] P_{12}(x, y) \\ I_0 f[C, (x, y)] P_{13}(x, y) \end{pmatrix}, \tag{5}$$

式中 $f[C, (x, y)]$ 表示原彩色图像的透射率， C 表示在样点 (x, y) 处的颜色。 I_0 为照明光的强度。经光纤面板传输后，从 P_2 端输出的分布为

$$I_2(x', y') = T[I_1(x, y)] = T \begin{pmatrix} RI_0 f[C(x, y)] P_{11}(x, y) \\ GI_0 f[C(x, y)] P_{12}(x, y) \\ BI_0 f[C(x, y)] P_{13}(x, y) \end{pmatrix},$$

根据(3)式的坐标变换关系，可以得到：

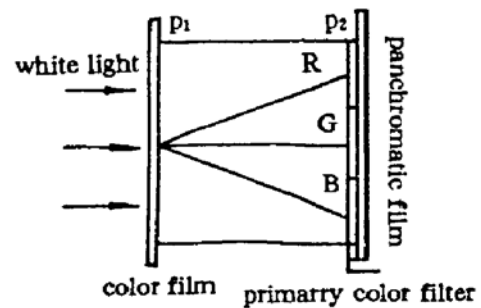


Fig. 1 Principle of color separating of the image

$$I_2(x', y') = \begin{vmatrix} I_0 f[R(3x' - 2d, y)] P_{21}(x', y') \\ I_0 f[G(3x' - d - Nd, y')] P_{21}(x', y') \\ I_0 f[B(3x' - 2Nd, y')] P_{21}(x', y') \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{21}[R(x', y')] \\ I_{21}[G(x', y')] \\ I_{21}[B(x', y')] \end{vmatrix}, \quad (6)$$

上式中的 R 、 G 、 B 表示图像从 P_2 端输出时，三个区域的图像分别进行了红(R)，绿(G)，蓝(B) 三原色滤色。(6) 式的意义是，原彩色图像经面板传输后，从 P_2 端输出三幅被压缩的三原色图像 $I_{21}[R(x', y')]$ ， $I_{21}[G(x', y)]$ 和 $I_{21}[B(x', y')]$ 。将 P_2 端的输出分布记录到全色黑白胶片上，经适当处理，可得到原彩色图像的分色黑白透明片的透射率为

$$\begin{aligned} J &= \beta I_2(x', y') \\ &= \beta I_0 f_R(3x' - 2d, y') P_{21}(x', y') + \beta I_0 f_G(3x' - Nd - d, y') P_{21}(x', y') \\ &\quad + \beta I_0 f_B(3x' - 2Nd, y') P_{21}(x', y') \\ &= \beta I_{21R}(x', y') + \beta I_{21G}(x', y') + \beta I_{21B}(x', y') \end{aligned} \quad (7)$$

由于此时的三分色信息都以黑白密度表示了，这里用下标 R 、 G 、 B 仅表示它们分别含有红(R)，绿(G)，蓝(B) 图像的信息， β 是与黑白胶片感光性能及显影过程有关的常数。

2 彩色全息图的记录与再现原理

本文采用两步彩虹全息术，首先利用图 2 所示光路摄制三分色主全息图 H_{1R} 、 H_{1G} 和 H_{1B} 。激光束经 B_S 分束后分成两束，一束经 M_2 反射提供参考光。另一束经 M_1 反射， L_1 扩束， L_2 准直照明三通道光纤面板的 P_2 端。经光纤面板传输后从 P_2 端输出作为物光。

将(7)式分布的透明片贴于三通道光纤面板的 P_2 端，使分布中的三幅图像分别与 P_2 端的三个区域对齐(因为三幅图像是记录在同一张胶片上的，而且

所用的面板与分色时的面板为同一个面板，所以，只要三幅图中某一幅与原来对应的区域对齐，其它两幅也就自动与其所对应的区域对齐了。因而这里的对位是很简单的。) S_1 是一个可移动的光栏，透光口径与 P_2 端的每个分区一样大，通过移动 S_1 ，可使三幅图像中的任一个单独通过光纤面板，在 P_1 端将依次输出如下三个光强分布，(参见(7)式及(4)式的逆变换)

$$\begin{aligned} O_R^2(x, y) &= \beta I_0 T^{-1}[f_R(3x - 2d, y) P_{21}(x, y)] \\ &= \beta I_0 f_R(x, y) P_{11}(x, y), \\ O_G^2(x, y) &= \beta I_0 T^{-1}[f_G(3x - Nd - d, y) P_{21}(x, y)] \\ &= \beta I_0 f_G(x, y) P_{12}(x, y) \\ O_B^2(x, y) &= \beta I_0 T^{-1}[f_B(3x - 2Nd, y) P_{21}(x, y)] \\ &= \beta I_0 T^{-1} f_B(x, y) P_{13}(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

S_2 是一个可移动的狭缝，拍摄时，通过移动 S_1 和 S_2 ，从 P_1 端输出的三个单色像分布分别在

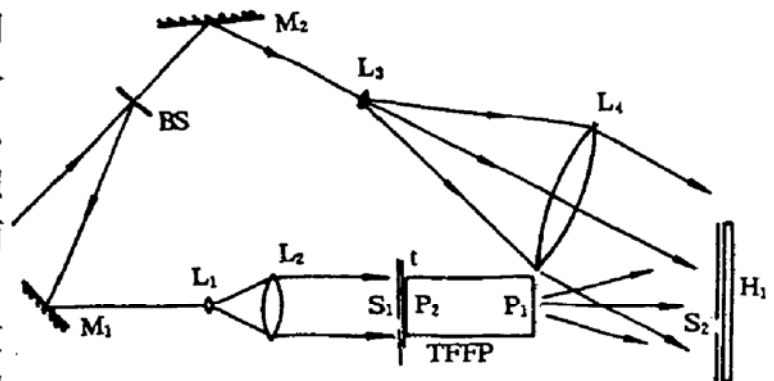


Fig. 2 Optical set-up of recording fresnel hologram of three primary color images

H_1 上形成三个条形全息图。三个条形全息图的间隔决定了最后彩色全息像的颜色, 设 λ_r , λ_g 和 λ_b 分别为最后再现的分色像的中心波长, λ_0 为记录波长, 则三个全息图的相对间隔为^[7]

$$\Delta_{gr} = \frac{\lambda_r - \lambda_g}{\lambda_r \lambda_g} \lambda_0 D \operatorname{tg} \theta, \quad \Delta_{bg} = \frac{\lambda_g - \lambda_b}{\lambda_g \lambda_b} \lambda_0 D \operatorname{tg} \theta \quad (9)$$

式中 Δ_{gr} 表示红分色像条形全息图与绿分色像条形全息图的间隔, Δ_{bg} 表示绿分色像条形全息图与兰分色像条形全息图的间隔, D 为面板的 P_1 端到 H_1 的距离, θ 为第二步彩虹全息光路的参考光与物光的夹角。第二步彩虹全息图的摄制光路如图 3 所示。用原参考光的共轭光照明三个条形全息图, 条形全息图本身同时起到狭缝作用。它的宽度可限制在 5 mm 以内, 三个全息图的再现像分布分别为:

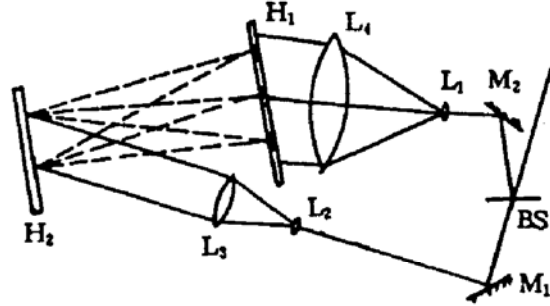


Fig. 3 Optical set-up of recording superposed hologram

$$\left. \begin{aligned} O_R^2(x, y) &= \beta I_0 f_R(x, y) P_{11}(x, y) \\ &= \beta I_0 \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M f_R(3nd - 2d, md) \delta(x - 3nd + 2d, y - md), \\ O_G^2(x, y) &= \beta I_0 f_G(x, y) P_{11}(x, y) \\ &= \beta I_0 \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M f_G(3n - d - d, md) \delta(x - 3nd + d, y - md), \\ O_B^2(x, y) &= \beta I_0 f_B(x, y) P_{13}(x, y) \\ &= \beta I_0 \sum_{n=1}^{N/3} \sum_{m=1}^M f_B(3nd, md) \delta(x - 3nd, y - md), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

这三个分布重合于距条形全息图为 D 的平面上(即原来的 P_1 面), 其物光分布可以写成

$$O(x, y) = O_R(x, y) + O_G(x, y) + O_B(x, y), \quad (11)$$

(11) 式中三项分别表示了原彩色图像的三基色信息, 而且这三项分布中的像点在空间上是互相“套合”的, 而不重叠。在此面上放置全息干板, 并引入参考光 R 曝光, 经适当处理即可得到真彩色全息图 H_2 。^{*}

用白光再现全息图 H_2 , 全息图将再现出与原三个条形全息图相对应的狭缝像 H_{1R} , H_{1G} , H_{1B} 。由于色散, 三个狭缝像将分别弥散成彩虹状。如果按(9)式确定三个条形全息图的间隔, 则可使 H_{1R} 的红色像, H_{1G} 的绿色再现像, H_{1B} 的兰色再现像重合, 眼睛在这三色像的重合位置观察全息图 H_2 , 可看到如下的分布:

$$\begin{aligned} I[C(x, y)] &= \alpha_1 \beta I_0 \sum_1^{N/3} \sum_1^M f(C_{\lambda_r}, 3nd - 2d, md) \delta(x - 3nd + 2d, y - md) \\ &\quad + \alpha_2 \beta I_0 \sum_1^{N/3} \sum_1^M f(C_{\lambda_g}, 3nd - d, md) \delta(x - 3nd + d, y - md) \\ &\quad + \alpha_3 \beta I_0 \sum_1^{N/3} \sum_1^M f(C_{\lambda_b}, 3nd, md) \delta(x - 3nd, y - md). \end{aligned} \quad (12)$$

* 这里要注意的是, H_2 上记录的三幅全息图是像点全息图。红、绿、兰像点互不重合, 这样的全息图再现像的亮度和色饱和度都比较好^[5, 8]。

式中 C_x, C_y, C_z 分别是主波长 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 所代表的颜色。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是与再现白光光谱分布有关的常数。根据文献[9]所给出的彩色全息图颜色匹配方案,可使(12)式的彩色分布与原图像(5)式彩色分布基本达到匹配。当然,文献[9]所给出的匹配方案,是所谓的白场匹配方案,不可能对所有颜色都达到完全匹配,但由于人眼对颜色的适应性和恒常性,实验表明是可达满意的主观匹配效果。当然客观上的颜色失真也是不可避免的。

在实验中,作者所使用的光纤面板的光纤直径为 $17 \mu\text{m}$,之所以如此,是这样考虑的:在记录全息图时,光纤面板的输出端 P_1 上的光场分布作为被记录物体将被记录成一条形全息图,设条形全息图的宽度为 D_H ,由于衍射极限影响,记录第二步彩虹全息图时其再现像的最小分辨距离为^[10]

$$e_l = \frac{\lambda D}{D_H}$$

式中 λ 为记录波长, D 为像距。设 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $D = 25 \text{ cm}$, $D_H = 5 \text{ mm}$, 则 $e_l \approx 0.032 \text{ mm}$,为了充分利用全息图的这一分辨率,光纤面板相邻像素间的距离应小于 0.032 mm ,由于三通道光纤面板三根光纤决定一个像素,其可分辨的距离由 $6d$ 决定^[6],因而对光纤直径的要求为

$$d \leq \frac{e_l}{6} \approx 0.0053 \text{ mm} = 5.3 \mu\text{m}$$

这相当于分辨率为 $1/2d = 94 \text{ lp/mm}$ 的普通光纤面板。文献[6]已指出,目前的技术可使光纤面板的分辨率达到 200 lp/mm 。但从另一方面看,作为直接用目视的全息图, 0.032 mm 的分辨距离人眼却不可分辨,众所周知,一般情况下,人眼在明视距离处分辨极限约为 0.1 mm 。这就给光纤面板的设计带来了宽松的条件,按此要求,光纤的直径为: $d \leq e_l/6 = 0.1/6 = 17 \mu\text{m}$,作为原理性实验,已给出满意的效果。图4是实验结果。实验中所使用的记录参数为:用 632.8 nm 作为记录波长,同时作为红色再现像的波长,选取 $\lambda_y = 520 \text{ nm}$, $\lambda_z = 450 \text{ nm}$ 分别为绿色再现像与蓝色再现像的主波长。 $D = 250 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$ 。因而 $\Delta_r = 31 \text{ mm}$, $\Delta_y = 27 \text{ mm}$ 。

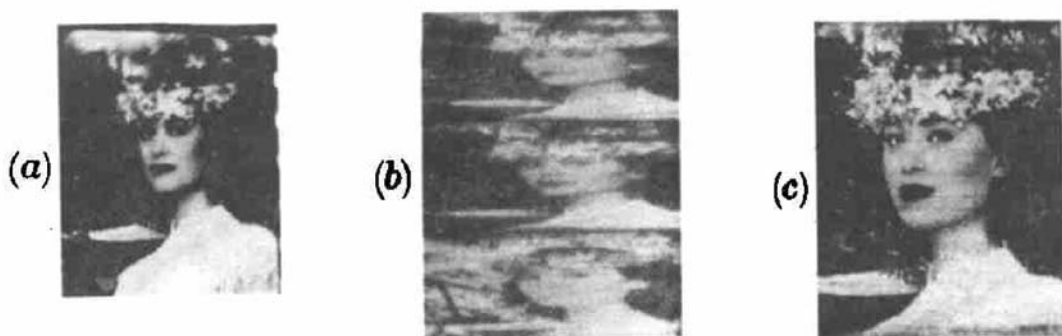


Fig. 4 Experimental result

(a)Original color image (b)Black-white photography of the three primary color image (c)Reconstructed image of the hologram

由于初次制作三通道光纤面板经验不足,难以避免光纤断线现象。因而再现像中明显出现一些黑线或不均匀。随着制作光纤面板技术不断提高,相信这一问题可以解决。

结 论 使用三通道光纤面板这一新型光学元件的分像分色及合成的功能,进行二维彩色全息图的制作有如下四个特点:1) 与电子分色相比,获得三分色片取样像简单;2) 记录三幅分色像条形全息图时,因三分色像已分区输入并在同一输出面 P_1 输出,所以不需对位;

3) 将分色像的条形全息图 H_{1R} , H_{1G} , H_{1B} 记录在同一张全息干板上, 这样又解决了第二次拍摄时的对位问题。4) 全息图 H_1 虽然是三幅全息图的合成, 但对其上任一点而言, 只有一个分色像的全息图。这有利于提高全息图再现像的亮度和色饱和度。

参 考 文 献

- [1] M. T. Gale, K. Knop, Color-encoded focused image holograms. *Appl. Opt.*, 1976, 15(9): 2189~2198
- [2] P. N. Tamura, Pseudocolor encoding of holographic images using a single wavelength. *Appl. Opt.*, 1978, 17(16): 2532~2536
- [3] R. Rodriguez-Vera, L. R. Berriel-Valdos, A. A. Morales-Romero, Holographic techniques in the color reproduction of two-dimensional. *Opt. Eng.*, 1989, 28(2): 191~196
- [4] 蔡铁权, 王 辉, 二维彩色彩虹像面全息图记录的一种新方法. *光学学报*, 1990, 10(7): 655~660
- [5] 蔡雪强, 柯重来, 真彩色模压全息图. *应用激光*, 1992, 12(14): 167~170
- [6] 王 辉, 郭履容, 唐继跃等, 利用光纤面板分色用于彩色图像的黑白存储. *光学学报*, 1991, 11(11): 1026~1031
- [7] P. N. Tamura, Multi-color image from superposition of rainbow holograms. *Proc. SPIE*, 1977, 126: 59~63
- [8] R. J. 科利尔, C. B. 伯克哈特, L. H. 林著, 盛尔镇, 孙明经译, 光全息学. 第一版, 北京, 机械工业出版社, 1983: 479~481
- [9] 王 辉, 全伟民, 应朝福, 彩色全息图颜色匹配的研究. *浙江师范大学学报*, 1993, 12(14): 167~171
- [10] 于美文, 张静方著, 全息显示技术. 第一版, 北京, 科学出版社, 1989: 49~51

A New Method of Recording 2-D Full-Color Hologram with Single Wavelength Light

Wang Hui Tang Jiyue

(Information Optics Institute of Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Guo Lurong

(Information Optics Institute of Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 1 November 1993; revised 28 February 1994)

Abstract A new method of recording 2-D full-color hologram is presented, in which a new optical device —— three channels optical fiber faceplate is used as the color separation and superposition of an image. By this method, the holography of recording 2-D full-color image with single wavelength laser can be simplified as well as the brightness and color saturation of the reconstructed hologram image can be improved.

Key words optical fiber faceplate, color hologram.