

线性三色采样叶形光栅的制作和应用

蔡铁权 王 辉 汤一新 彭保进

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

唐继跃

(四川联合大学信息光学研究所, 成都 610064)

摘 要 用新颖的线性三色采样叶形光栅, 可以在单色胶片上一步记录彩色图像。这种记录和再现过程不仅操作方便, 仪器简单、经济, 而且避免了色串扰、莫尔(Moiré)条纹与分辨率的损失, 消除了互调制, 大大提高了光能利用率。本文给出了用计算机制作叶形光栅的方法, 讨论了用这种光栅编码彩色图像的原理及其在全息照相和光学信息处理等其它方面潜在的应用。

关键词 线性三色采样叶形光栅, 彩色胶片档案存储, 图像处理。

1 引 言

由于彩色胶片的有机染料在长期保存中的不稳定性影响彩色图像的档案存储, 为了避开彩色褪色, 提出了许多衍射彩色摄影和变换记录的方法。Mueller^[1]用三色光栅在单色透明片上编码彩色图像。Grousson 和 Kinany^[2]提出用正交光栅代替三色光栅编码彩色像。Gale 和 Knop^[3]提出彩色编码聚焦像全息图, 在白光中再现形成高保真度彩色像。这些方法都不可避免地存在着光栅的互调制和彩色串扰。为此, Yu^[4]提出计算机制作三色光栅在单色透明片上记录彩色信息的一步方法。Yu^[5]等人还提出用一步彩虹全息过程实现彩色胶片的档案存储。这种方法尽管十分简单并且可以在再现时直接观察, 但彩虹全息图狭缝的存在引起垂直于狭缝方向上的边缘分辨率损失, 彩虹全息图存在着固有的色模糊, 相干噪声也不可避免。Yu^[6]等人又提出使用柱面镜的一步彩虹全息术, 这样可以省略漫射器与狭缝, 使全息图具有高分辨率, 低散斑噪声和低色模糊。这种方法的不足在于不能完全消除相干噪声和色模糊, 而且存储系统是昂贵和复杂的。同时, Ih^[7]提出傅里叶变换彩色全息图实现档案存储, 再现时在频谱面实行低通滤波, 这样, 色串扰可以完全压缩, Ih 将这种技术应用于彩色电影胶片的存储。Vanidhis^[8]采用了彩色滤波的部分相干光散斑法实现彩色胶片的黑白存储。而 Takeda^[9]提出用随机移相屏进行高质量和高密度存储。Tsunoda 和 Takeda^[10]又提出采用随机相位采样法。在高密度存储中, 透镜的使用必将限制全息图的信息容量, 记录介质有限的调制传递函数又会限制参考点附近的视场大小^[11]。

Bergen^[12]曾提出一种光纤光学面板彩色像处理系统, 这种系统利用光纤光学面板作为传

像元件,用三色光栅分色。作者^[13]曾设计与制作了一种多通道编码光纤面板,即可作为存储元件又可成为恢复元件,可用于彩色图像的黑白存储。但编码光纤面板的制作工艺比较复杂,作为编码器件来说体积相对较大。

考虑到彩色信息存储的关键在于编码处理方法,鉴于传统的编码形式,本文提出了一种新颖的线性三色采样叶形光栅。文中将讨论线性三色采样叶形光栅制作的原理与方法,介绍其在彩色图像档案存储中的应用及其在光学全息照相和光学信息处理其它方面潜在的应用前景,并讨论它的独特的优点。

2 原理和理论分析

线性三色采样叶形光栅的结构如图1所示。由于所设计的栅线是叶形的,三色栅线之间有交叉而完全没有交迭,因此避免了胶片非线性的效应。其中绿色横向的周期性图形,在 x 方向有周期 d_g , y 方向有周期 d_{gy} ,红色的周期性图形在 y 方向有周期 d_r ,在 x 方向有周期 d_{rx} ,蓝色的周期性图形在 y 方向有周期 d_b ,在 x 方向的周期 d_{bx} ,并且有关系:

$$d_{rx} = d_{bx}, \quad d_{ry} = d_{by}$$

Fig. 1 Linear tricolor sampling leaf-shape grating

红、绿、蓝三色透明单元是大小完全相同的叶形。

线性三色采样叶形光栅的透射率函数可以写成:

$$f(x, y) = f_r(x, y) + f_g(x, y) + f_b(x, y) \quad (1)$$

式中 $f_r(x, y)$, $f_g(x, y)$ 和 $f_b(x, y)$ 分别表示红、绿、蓝三色的光栅透射率函数。

为了简化,在文中选取水平方向(绿色)光栅的一个周期进行讨论。设叶形栅线的圆弧半径为 R ,取中心为原点,建立坐标如图2所示。

这一周期的强度透射率分布如图3所示。与这个强度透射率相对应的振幅透射率分布的函数 $t_r(x, y)$ 可以表示为:

$$t_r(x, y) = \begin{cases} 1, & -\frac{R}{2} \leq x \leq \frac{R}{2}, & -\frac{\sqrt{3}}{2}R \leq y \leq \sqrt{3}R + \sqrt{R^2 - x^2} \\ 0, & -\frac{R}{2} \leq x \leq 0, & -\sqrt{3}R + \sqrt{R^2 - x^2} \leq y \leq \frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{1}{2}\sqrt{3R^2 - 4Rx - 4x^2} \\ 0, & 0 \leq x \leq \frac{R}{2}, & -\sqrt{3}R + \sqrt{R^2 - x^2} \leq y \leq \frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{1}{2}\sqrt{3R^2 + 4Rx - 4x^2} \\ 1, & -\frac{R}{2} \leq x \leq 0, & \frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{\sqrt{3R^2 - 4Rx - 4x^2}}{2} \leq y \leq -\frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{\sqrt{3R^2 - 4Rx - 4x^2}}{2} \\ 1, & 0 \leq x \leq \frac{R}{2}, & \frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{\sqrt{3R^2 + 4Rx - 4x^2}}{2} \leq y \leq -\frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{\sqrt{3R^2 + 4Rx - 4x^2}}{2} \\ 0, & -\frac{R}{2} \leq x \leq 0, & -\frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{1}{2}\sqrt{3R^2 - 4Rx - 4x^2} \leq y \leq \sqrt{3}R - \sqrt{R^2 - x^2} \\ 0, & 0 \leq x \leq \frac{R}{2}, & -\frac{\sqrt{3}}{2}R + \frac{1}{2}\sqrt{3R^2 + 4Rx - 4x^2} \leq y \leq \sqrt{3}R - \sqrt{R^2 - x^2} \\ 1, & -R/2 \leq x \leq R/2, & \sqrt{3}R - \sqrt{R^2 - x^2} \leq y \leq \sqrt{3}R/2 \end{cases} \quad (2)$$

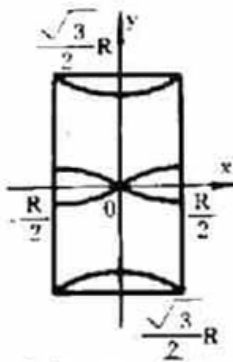


Fig. 2 Coordinate of the green horizontal cell of the leaf-shape grating

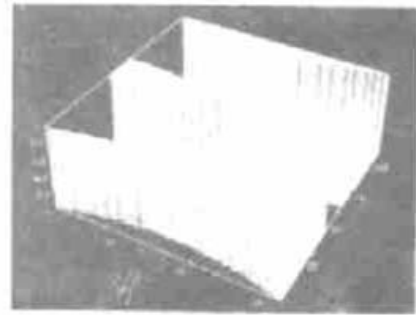


Fig. 3 Intensity transmissivity of the green horizontal cell

$t_r(x, y)$ 的频谱分布可以表示成:

$$T_r(\xi, \eta) = \iint t_r(x, y) \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (3)$$

式中 ξ, η 是空间频率。

上述变换无法求得其解析结果, 可以用计算机对方程(3)实现数值积分, 得到光栅谱(绿色)的强度分布如图 4 所示。

对于整个线性三色采样叶形光栅, 其空间频谱分布的模拟结果如图 5 所示。显然, 与三个基色光栅对应的频谱, 除了在零级附近有交迭外, 在三个方向上明显地分开。这种数值积分的结果与实验结论是一致的, 与衍射图形对于衍射孔形状关系的分析也是符合的^[14]。对于彩色图像档案存储的一般原理阐述与传统方法^[1-6]相似, 这里不再赘述。

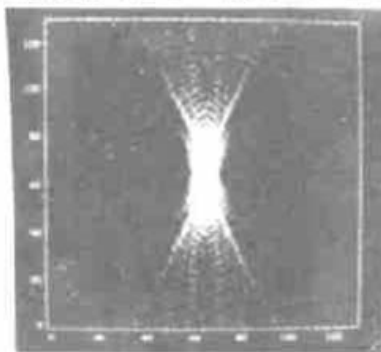


Fig. 4 The distribution of spectra of the green horizontal grating



Fig. 5 The spatial frequency distribution of the leaf-shape grating

3 计算机制作线性三色采样叶形光栅

通过计算机设计出叶形光栅, 用 C-4500 图像扫描仪绘图, 集成电路微缩技术将光栅图微缩在 $24 \times 36 \text{ mm}^2$ (135 胶片的幅度) 的彩色透明片上。由于绘图设备分辨率的限制, 文中用于存储彩色胶片的光栅采样频率 $1/d_m = 8 \text{ lp/mm}$ 。实验结果表明, 所用光栅已能综合出质量较好的彩色图像。这是因为对于色度调制而言, 人眼视觉系统对于彩色图像具有更为明显的低通特性^[15]。事实上, 使用更高分辨率的绘图仪与微缩技术, 光栅的频率是可以完全满足分辨率的要求的。

另一方面, 叶形光栅的制作中还必须考虑到彩色图像恢复时的彩色平衡。由于编码是一次完成的, 即对于彩色图像的每一个取样点, 曝光量 E 决定于:

$$E = IT \quad (4)$$

式中 T 是曝光时间, 对叶形光栅的三色取样是相同的, 这就使 E 决定于与波长 λ 有关的曝光强度 I . 这种强度又与叶形光栅对三基色的光透射率有关. 根据色度学原理, 某种色光的三刺激值为:

$$C = R + G + B \quad (5)$$

$$\text{而: } R = \int kS(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda, \quad G = \int kS(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda, \quad B = \int kS(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

在制作叶形光栅时, 可以在计算机上方便地调整三种取样光栅的色度, 使像恢复时的光谱三刺激值 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ 满足色保真度的要求, 即得到最佳的彩色图像编码. 当然, 在恢复彩色图像时还可在傅里叶频谱面上选择合适的彩色滤波片, 对颜色进行校正, 得到与原存储彩色图像相一致的恢复像.

4 彩色胶片档案存储中的应用

利用参考文献[4]中图7的光路对彩色胶片实现一步编码记录. 用作编码记录的胶卷是普通的全色黑白摄影胶片, 胶片与叶形光栅相接触. 记录后的胶片, 在放大的情况下, 可以很清楚地观察到在原彩色图像的白色处, 叶形光栅中三个方向的栅线都编码在记录胶片上, 绿色处则只有绿色的横方向的光栅编码. 表明实验结果与编码原理的分析相一致.

图像恢复时, 采用白光处理技术, 光路如图6所示. 图中 P_1 、 P_2 和 P_3 组成一个 $4f$ 系统, 被编码的彩色图像放在输入平面 P_1 处, 在 P_2 平面处得到编码像的空间频率分布, 其分布类似图5, 三个方向均为白光.

这种频谱分布与传统光栅编码方法^[1-4]的频谱完全不同, 图中明显的有三个方向(依次夹角为 60°)的谱分布, 它们分别携带原彩色图像的红、绿、蓝三种原色信息. 这就使解码过程大为简化, 不必选取三个一级衍射斑, 而是让几乎全部衍射谱都通过, 既大大提高了光能利用率, 也没有图像分辨率损失.

将三原色滤色片做成如图7所示的滤波器置于谱面, 使各颜色与相应的谱对准. 如果在 P_3 平面处放上观察屏, 可以直接观察恢复的彩色像.

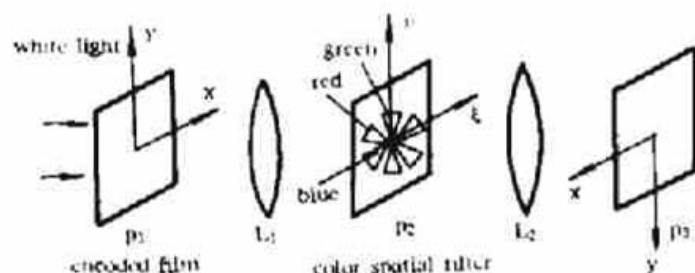


Fig. 6 White light processor for spatial color decoding



Fig. 7 Spatial color decoding filter

作为验证, 实验对一幅色彩丰富, 结构比较复杂的人像进行处理. 图8是实验结果, 其中图8(a)是原彩色图像, 图8(b)是经叶形光栅编码后恢复的彩色图像. 尽管所用叶形光栅的空间频率比较低, 色度也没有调整到最佳, 但运用线性三色采样叶形光栅进行彩色图像档案存储的结果还是很理想的.

此外, 将叶形光栅装入照相机, 可以用黑白胶片记录彩色图像.

利用叶形光栅还可以单波长记录真彩色全息图, 记录时能方便地精确对位、视场大、无色模糊

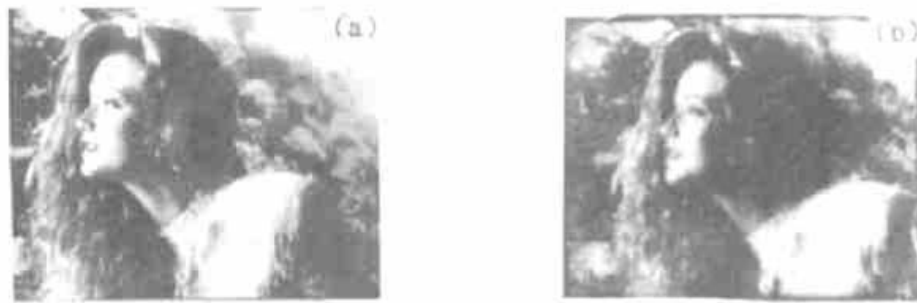


Fig. 8 The experimental result of encoding color image with the leaf-shape grating (a) the original color picture, (b) the retrieved color photograph from the encoded monochrome transparency

结 论 本文介绍了线性三色采样叶形光栅的制作, 编码原理与应用。由于这种光栅三基色栅线之间完全没有交迭, 记录时曝光的动态范围大大扩展。没有彩色串扰, 避免了莫尔条纹, 可以利用傅里叶频谱面上的全部衍射谱项, 光能利用率高, 无边缘分辨率损失。恢复图像可以直接观察, 色彩匹配容易调整。光栅的制作主要由计算机完成, 显得方便、精细, 而且复制容易。研究表明, 这种光栅在光学全息照相与光学信息处理方面是一种很有应用潜力的元件。

参 考 文 献

- [1] P. F. Mueller, Color image retrieval from monochrome transparencies. *Appl. Opt.*, 1969, 8(10): 2051~2057
- [2] R. Grousseau, R. S. Kinany, Multicolor image storage on black and white film using a crossed grating. *J. Opt.*, 1978, 9(6): 333~339
- [3] M. T. Gale, K. Knop, Color-encoded focused image holograms. *Appl. Opt.*, 1976, 15(9): 2189~2198
- [4] F. T. S. Yu, X. X. Chen, K. E. McClure, Computer generated linear tricolor sampling pattern and its application. *J. Opt.*, 1986, 17(6): 270~278
- [5] F. T. S. Yu, Anthony Tai, H. Chen, Archival storage of color films by rainbow holographic technique. *Opt. Commun.*, 1978, 27(3): 307~310
- [6] P. H. Ruterbusch, S. L. Zhuang, F. T. S. Yu, Progress report on archival storage of color films by a one-step rainbow holographic process. *Opt. Commun.*, 1981, 37(5): 335~338
- [7] C. S. Ih, A holographic process for color motion-picture preservation. *SMPTE J.*, 1978, 87(12): 832~834
- [8] E. D. Vanidhis, Partial coherent light speckles for color image recording and retrieving from black and white transparencies. *Optik*, 1987, 76(4): 132~138
- [9] Y. Takeda, Hologram memory with high quality and high information storage density. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1972, 11(5): 656~665
- [10] Y. Tsunoda, Y. Takeda, High density image storage holograms by a random phase sampling method. *Appl. Opt.*, 1974, 13(9): 2046~2051
- [11] H. J. Caulfield 主编, 郑庸等译, 光全息手册, 北京, 科学出版社, 1988: 112~114
- [12] R. F. Bergen, Fiber optic faceplate excited Ruticon color image reproduction system. *Appl. Opt.*, 1975, 14(8): 1770~1771
- [13] 王 辉, 郭履容, 唐继跃等, 利用光纤面板分色作彩色图像的黑白存储. *光学学报*, 1991, 11(11): 1026~1031
- [14] M. F. Guasti, M. De la C. Heredia, Diffraction pattern of a circle/square aperture. *J. Mod. Opt.*, 1993, 40(6): 1073~1080
- [15] H. Lang 著, 张水辉等译, 色度学与彩色电视. 北京, 中国电影出版社, 1985: 358~359

The Generation and Application of Linear Tricolor Sampling Leaf-Shape Grating

Cai Tiequan Wang Hui Tang Yixin Peng Baojin
(*Information Optics Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004*)

Tang Jiyue

(*Information Optics Institute, Sichuan Union University, Chengdu 610064*)

(Received 17 January 1996)

Abstract The application of a novel linear tricolor sampling leaf-shape grating to one-step information recording on a monochrome film is proposed. In this paper, it is proved that the proposed application can make the recording and retrieving simple and economical to implement, the color-cross-talk, Moiré fringes and marginal loss in resolution avoided, the mutual modulation cleared up, the utilization ratio of light energy improved greatly. A method of computer generating the linear tricolor sampling leaf-shape grating is described, the principle of encoding color image using the leaf-shape grating is presented and the potential application to holography and optical information processing is also discussed.

Key words linear tricolor sampling leaf-shape grating, archival storage of color films, image processing.