

# 黑白胶片光栅编码彩色摄影术

言 放

(南开大学物理系, 天津 300071)

**摘 要** 用空间光栅(也称为空间编码器)将彩色景物记录到一张黑白胶片上(这一过程称为将彩色景物编码, 所得的黑白透明片称为编码片)并通过再现(称为解码)装置再现彩色景物的思想和技术可以追溯到 1899 年, 已有近百年的历史。开始时, 类似于电子学中用时间信号调制载波方法, 用彩色图像来调制光栅。十多年后便出现第一个萧条时期, 持续将近半个世纪。期间比较重要的成果是用三个光栅进行三次编码记录的方法。到本世纪六十年代, 又兴旺了一段时间, 其中最重要的成果是六十年代后期的用一个三色光栅进行一次编码记录的方法和技术, 并且制成相机, 在军事上和电视新闻报道中得到成功的应用; 在六十年代末, 另一项重要成果是认识到到编码过程中线性性的重要并进行了比较详细的分析。傅里叶光学的出现, 提供了很好的解码系统。到了八十年代, 又进入第二个萧条时期, 一直到今天。可以说, 从八十年代初期至今, 没有任何重要的进展。由于这个技术本身的一些难以克服的弱点, 再加上彩色胶片的优势, 使得它没有立足之地。它在多重像储存和多谱段摄影中还有一些应用外, 在彩色摄影方面, 无论从质量还是从价格, 都是无法和彩色胶片相匹敌的。

**关键词** 黑白胶片光栅编码, 彩色信息的编码和解码, 衍射彩色摄影术, 载波照相术。

## 1 黑白胶片光栅编码彩色摄影的简要历史

这一技术的历史大致可以分为四个时期, 两个时期兴旺, 两个时期萧条。

1) 这一技术的发明者是 R. W. Wood。他在 1899 年发表了使用取向相同、频率不同的三种光栅在黑白胶片上记录彩色图像并进行观察的基本原理和实验结果<sup>[1, 2]</sup>。他使用红、绿、蓝三原色滤色片, 通过分别曝光, 将彩色景物按三原色分色记录在三张黑白胶片(正片)上。然后用取向相同、频率不同但“匹配”的三个振幅线光栅, 将这三张黑白正片经分别曝光、编码记录在另一张黑白胶片上, 其结果是黑白图案上按原彩色景物的各个部位颜色的不同而分别记录有一种或二种或三种光栅线。所以, 在黑暗背景下的一盆郁金香, 花是红的、叶是绿的, 用蓝花盆, 经编码记录后的黑白胶片(正片)上的图案如图 1 所示。因为花、叶、盆的颜色正好分别是三张滤色片的颜色, 所以分别只记录有一种频率的光栅线。因背景是黑的, 所以没有光栅线。如果背景是白的, 则同时记录有三种频率的光栅线。所使用的再现装置只有一个物镜和一个供人眼观察用的小孔。编码和解码过程中都用日光。1904 年 Wood 对记录方法作了一些改进<sup>[3]</sup>。

Wood 的第一篇文章发表几周后, T. Thorp 提出专利申请, 用频率相同而取向不同的三种光栅来代替<sup>[4]</sup>。用 Wood 的方法, 在黑白胶片同一部位, 可能记录有不止一种光栅, 这种重叠的光栅, 会产生它们的和频与差频光栅, 后者即是莫尔条纹<sup>[5]</sup>, 这导致串色, 造成彩色失真。H. E. Ives 继续 Wood 的工作, 他认识到串色是光栅叠置造成的, 所以他将彩色景物的三原色正片分别通过一个可平移(每次移动一个缝宽)的高频光栅(其缝宽是间隔的一半)和三个频率不同但“匹配”的衍射光栅(它们和可平移光栅垂直)经三次曝光分带交替并列地记录在一张黑白胶片上。这样就消除了莫尔条纹, 从而克服了串色现象<sup>[6]</sup>。为了提高光能利用率, 提高像的亮度, 他还将再现装置作了改进<sup>[6]</sup>, 称之为衍射彩色映画器(Diffraction Chromoscope)<sup>[7]</sup>。

2) C. Bocca 是三次编码记录方法的发明者。他在 1936 年的专利中<sup>[8]</sup>, 利用三原色滤色片和三个取向不同的光栅, 通过三次编码将彩色景物按三原色分色记录在一张黑白胶片上\*, 并给出相应的再现光学装置。但从二十世纪一十年代一直到五十年代, 这个技术很少有人去继续研究了。主要原因是 1935 年三重彩色胶片的问世<sup>[9, 10]</sup>。黑白胶片光栅编码彩色摄影的质量和价格根本无法和彩色胶片相比, 甚至无法和色屏(Screen Plate)方法相比, 色屏方法的第一个专利被授予是在 1868 年, 获得者是 L. Ducos du Hauron<sup>[12]</sup>, 而首先把之推向市场的是 J. Joly 是在 1895 年<sup>[12]</sup>, 用他制造的色屏。但商业上成功最早的是由法国 Lumière 公司在 1907 年制造的色屏, 一直到三十年代初期还使用<sup>[12]</sup>。所以从二十世纪一十年代一直到五十年代是这个技术的第一个萧条时期。

3) A. Macovski 是一次编码记录方法的发明者, 他设计制作了三色光栅和一次编码用照相机, 并进行了成功的试验。

Macovski 在 1967 年 4 月 28 日、6 月 19 日和 1968 年 12 月 26 日以及 T. A. Smith 在 1967 年 6 月 22 日申请了利用一个三色光栅进行一次编码将彩色景物记录在一张黑白胶片上的专利<sup>[14-17]</sup>。Macovski 的三个专利的主要内容有:

- (1) 三色光栅的制作。专利中称三色光栅为空间频率编码器, 包括取向相同频率不同的三减原色线振幅光栅, 取向不同的三减原色线振幅光栅(图 2)和三减原色菲涅耳带光栅;
- (2) 利用一个三色光栅将彩色景物通过一次曝光记录在一张黑白胶片或热塑材料上, 即一次编码记录;
- (3) 实现一次编码用照相机设计(图 3)和制作;
- (4) 再现彩色景物装置, 即解码装置;
- (5) 同时记录多个景物于一张黑白胶片上, 即多重像储存;
- (6) 显示多重像储存黑白胶片中任何一个像的装置。



Fig. 1 Red tulip with green leaves growing in a blue pot. The color are encoded in three gratings with about 80, 95 and 100 lines/mm. Example given by R. W. Wood in *Nature* 1899

\* 该专利中的三次编码是这样进行的: 先将彩色景物分别通过三原色滤色片投射到三张黑白胶片上, 由此得三张正片, 再将这三张正片分别通过三个取向不同的光栅——对应套准投射到同一张黑白胶片上。



Fig. 2 Design for tricolor grating, given by A. Macovski in 1967

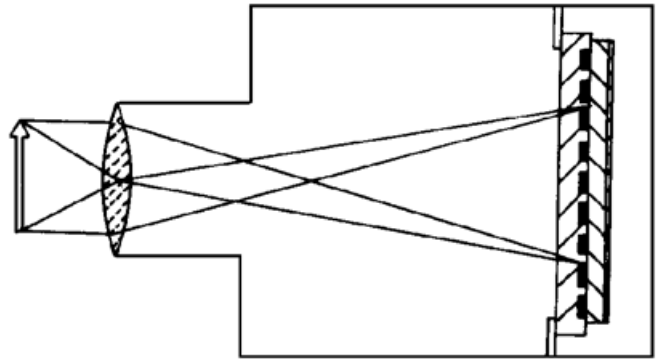


Fig. 3 Design for the camera implementing the snapshot method using a tricolor grating, given by A. Macovski in 1967

这三个申请于 1970 年 4 月 7 日、10 月 13 日和 1971 年 6 月 15 日被授予专利。他还有一些与之有关的更早的一些专利,例如在 1965 年 6 月 24 日申请的一个专利<sup>[18]</sup>。

4) P. F. Mueller 是认识到用黑白胶片光栅编码进行多重像储存中的线性性的重要性并进行比较彻底的分析的第一人。

Mueller 在 1969 年 2 月 10 日和 10 月在美国《应用光学》上发表两篇文章<sup>[19, 20]</sup>,第一次对这个技术进行了理论上详细的分析,特别是从物理和数学两个方面作了比较详细的分析,指出了线性处理的重要性,即在处理时,使得输入强度(曝光强度)与编码后的黑白透明片(反转片或正片)的振幅透过率之间呈线性关系。这对于克服串色和莫尔条纹问题至关重要。由于这一工作的重要性,所以以后凡提到这个技术时,必以这两篇文章为代表<sup>[21-24]</sup>,因为线性性是这个技术遇到的最大问题之一。而三色光栅,特别是三色光栅的制作,一次编码和解码装置等与之相比起来,都不是问题。正如文献[25]中指出的那样,“直到今天(指 1970 年,作者注), (这个技术)成功与否似乎在于对记录介质有关特性的分析和控制。”

在解码时, Mueller 用的照明光源是具有三个独立准单色(红、绿、蓝)带的部分相干光源, F. T. S. Yu 则采用白光<sup>[24]</sup>。从八十年代至今,出现了第二个萧条时期。原因和第一个萧条时期差不多。可以说从 Mueller 的 1969 年的两篇文章以后,除了 F. T. S. Yu 在 1980 年提出的用白光照明解码外,在这个领域,没有任何大的进展,更谈不上重大进展。被冠以“异常重大的技术突破”和“国际首创”并被选为 1991 年中国十大科技新闻之一的所谓“黑白胶片作彩色摄影技术”<sup>[26-28]</sup>(它由一篇文章<sup>[29]</sup>和一个专利<sup>[30]</sup>组成)实际是抄袭(甚至在某一方面倒退)的产物。只要将这个专利和 Macovski 的专利<sup>[14-16]</sup>中的任何一个放在一起对比就能得出这个结论。如果将它们的附图进行对比,连外行也不难得出这个结论。

这个技术在各个领域的应用也是当时研究的方向。它主要应用在多个黑白景物或彩色景物的档案储存和显示<sup>[14-16, 19, 24, 31-39]</sup>、彩色电视系统<sup>[40-46]</sup>、遥感(多谱段照相机)<sup>[21]</sup>、彩色印刷系统<sup>[17]</sup>以及褪色透明片的彩色复原<sup>[47]</sup>等等。

## 2 基本原理和基本困难

### 1) 基本原理

任何彩色摄影和再现都基于彩色景物的颜色分解(拍摄)和颜色综合(再现)。

分色的方法可以通过衍射、折射(色散)或干涉等效应;也可以通过光谱吸收,如染料的

光谱吸收, 彩色底片便是通过这种吸收进行分色的。

分色的方法也可以按照光谱色分解, 也可以根据麦克斯韦-亥姆霍兹(Maxwell-Helmholtz)的颜色视觉理论按三原色分解。相应的再现, 可分为再现入射光的光谱, 称为光谱色再现(也称为直接再现或物理再现)或者按三原色匹配再现, 也称间接再现<sup>[12, 13]</sup>。在色度学中, 有所谓同色异谱现象, 即两个物体具有不同的光谱分布, 但在特定照明条件下对于特定的标准观察者来说, 有可能显示出相同的颜色, 即具有相同的三刺激值。对于光谱分布相同的物体在任何照明条件下, 对任何标准观察者都具有相同的颜色, 这些物体的颜色称为同色同谱色<sup>[48, 49]</sup>。物理再现中最著名的是 Lippmann 方法, 即利用干涉效应进行分色<sup>[50-52]</sup>, 这一成果还获 1908 年诺贝尔物理学奖<sup>[52]</sup>。但由于 Lippmann 法的速度很慢, 并需要特殊的观察条件, 所以在商业上从来没有成功过<sup>[12]</sup>。另一个物理再现法是利用棱镜折射造成的色散效应, 称为微细色散法(Microdispersion method)<sup>[12, 13]</sup>。按三原色分解和综合的方法, 即三原色匹配方法的基本思想来自于 J. C. Maxwell。他在 1861 年第一个用此法给出了彩色像<sup>[12]</sup>。Maxwell 发展了 T. Young 和 H. Helmholtz 的色视觉理论, 并按照色视觉理论, 利用红、绿、蓝原色滤色片, 通过三次曝光将彩色景物按三原色分色记录在三张黑白胶片上(这是由当时一个著名的摄影师为他准备的), 然后用三台投影仪分别通过三原色滤色片照射这三张黑白透明正片配准地投射到屏幕上而再现彩色像。

三原色匹配再现方法又可以分为加法和减法两类<sup>[12, 13, 48, 49, 53, 54]</sup>。以黄、蓝两张滤色片为例, 若二束白光分别通过它们投射到同一屏幕上, 它们实行的是相加运算, 即其结果等价于一个滤色片, 这个等价滤色片的谱透过率是各自谱透过率的相加<sup>[55]</sup>, 此时屏幕上混合色的三刺激值是两个颜色各自三刺激值的相加。因蓝、黄是互补色, 即白光被吸收蓝色(或黄色)后变成黄色(或蓝色), 所以最后屏幕上显示白色; 若一束白光接连通过两张滤色片后投射到屏幕上, 则实行的是相乘运算, 即等价滤色片的谱透过率是各自谱透过率的乘积<sup>[55]</sup>。因为透射色的三刺激值和其谱透过率成正比, 所以混合色的三刺激值和两个谱透过率的乘积呈线性关系, 因此混合色的三刺激值就不可能只由两个色的三刺激值计算得到。因为入射光通过滤色片时都被吸收掉, 即被减掉一部分辐射功率, 接连通过二张滤色片, 则最后透过的光是经两次减法的结果。从这个意义上, 称这种颜色混合为减法混合。蓝、黄两色减法混合为黑色。所以颜色加法(混合)指的是混合色的三刺激值是各自三刺激值的相加, 或者谱透过率(对于透明物体)或者是谱反射率(对于不透明物体)的相加; 而颜色相减(混合)指的是能量吸收, 或者定义为非加法混合, 即混合色的三刺激值不能由各自颜色的三刺激值相加得到<sup>[48, 49, 54]</sup>。

考虑到相加混合时, 通过红、绿、蓝三原色相加可以得到最多的混合色, 所以一般选择它们为三加法原色; 相应地, 在减法混合时, 选择其补色, 即青、品红和黄色为三减法原色<sup>[48, 49, 54]</sup>。

## 2) 三原色匹配法彩色摄影和再现中的基本问题

要按三原色匹配进行彩色摄影和再现, 必须先将彩色景物按某种方式进行三原色(红、绿、蓝)分解, 然后再进行三原色综合, 因此需要解决以下三个问题。

### (1) 三原色的选择

即使规定用红、绿、蓝为加法三原色, 但其相应滤色片的谱透过率还可能有很大差异。一般不可能也无必要选择光谱色为三原色, 例如, 可选择图 4 的谱透过率作为三原色滤色片的透过率。一般选取三原色的标准是: 由它们混合的色品范围大, 亮度透射或反射率

大<sup>[11~12]</sup>。还有一些其它要求,如在三色光栅制作中提出的要求。

## (2) 三原色分解

要进行三原色分解必须有三原色滤色片\*。三原色滤色片可以完全分开,也可以合在一起,

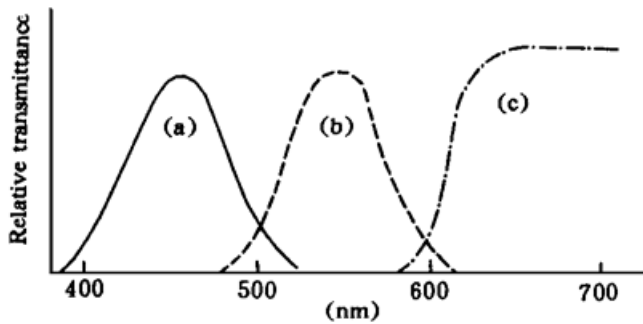


Fig. 4 Spectral transmittances for (a) the blue, (b) the green and (c) the red filter elements

后者如三色光栅中的滤色片,以及色屏法中的色屏。在拍摄时,彩色景物的三原色必须被“分开”记录。这里所谓“分开”记录,并不一定要求由三张黑白胶片分开记录。例如色屏<sup>[11~13]</sup>,其中一种是在基片上周期或随机地安置大量很小的红、绿、蓝滤色颗粒,这些颗粒非常小,在一般观察条件下(例如,不用放大镜),人眼是无法分辨这些小颗粒的。色屏不显示任何彩色或接近于无彩色。这种滤色片与某些鸟类和爬行动物的色屏非常类似。

拍摄时,将黑白胶片紧靠色屏,然后将彩色景物经色屏记录在黑白胶片上。这样,虽然彩色景物的三原色像没有被整体地分开记录,但每一个小单元的三色像确是被分开记录的。还例如利用空间光栅也可以达到分开记录的目的。这是光栅编码方法之核心,所以下面对之进行比较详细的讨论。

## (3) 利用空间光栅进行三原色分解

先进行纯数学讨论,再考虑其光学实现,最后讨论三原色像分开记录问题。

为简单起见,假定是利用空间正弦光栅进行三原色分解<sup>[56]</sup>。先讨论一维情况,然后讨论二维情况。设正弦光栅的强度透过率为

$$P = (1 - \cos 2\pi v_0 x) / 2 \quad (1)$$

式中  $v_0$  为光栅频率。一个空间信号  $T(x)$  和正弦光栅的强度透过率相乘,并经傅里叶变换后得<sup>[47]</sup>

$$\begin{aligned} \mathcal{A}\{P(x)T(x)\} &= (1/2)\{\delta(v) + (1/2)[\delta(v - v_0) + \delta(v + v_0)]\} * \hat{T}(v) \\ &= (1/2)\{\hat{T}(v) + (1/2)[\hat{T}(v - v_0) + \hat{T}(v + v_0)]\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中\*代表卷积运算,  $\hat{T}(v)$  为  $T(x)$  的傅里叶频谱。这样,一个信号乘上一个正弦光栅,其乘积在频谱空间中有三个部分,它们分别为信号频谱(称为零级频谱)和它经平移  $\pm v_0$  后得的两个频谱,称为  $\pm 1$  级频谱。如果三个二维信号  $T_m(\mathbf{r})$  ( $m = 1, 2, 3$ ) 分别乘上频率相同取向不同的三个正弦光栅,然后相加

$$\tau(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^3 P_m(\mathbf{r}) T_m(\mathbf{r}) \quad (3)$$

其中  $\mathbf{r} = (x, y)$

$$P_m(\mathbf{r}) = [1 - \cos(2\pi v_m \mathbf{r})] / 2 \quad (4)$$

$v_m$  为二维矢量空间频率,  $|v_m| = v_0$ 。  $\tau(\mathbf{r})$  的傅里叶变换为

$$\mathcal{A}\{\tau(\mathbf{r})\} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{m=1}^3 \hat{T}_m(v) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^3 [\hat{T}_m(v - v_m) + \hat{T}_m(v + v_m)] \right\} \quad (5)$$

即在二维频谱空间中,每个信号都有三部分,它们是各自频谱及沿不同的光栅方向平移  $\pm v_0$

\* 在减法摄影中通过乳剂的选择敏感性代替滤色片

而得。如果三个信号的频谱范围不大, 那么有可能通过这种平移使三个信号的频谱及经平移以后的频谱都没有重叠部分(除开  $v = 0$  附近的三个零级频谱必然有重叠部分外), 从而达到“分开”记录的目的。实际上, 这里的“分开”是指在频谱空间中的分开, 而在信号空间中并没有被分开。图 5 和图 6 分别是三个正弦光栅的取向和三个信号频谱及其平移后的频谱, 这里取

$$v_1 = (1, 0) v_0, \quad v_2 = (1/2, \sqrt{3}/2) v_0, \quad v_3 = (-1/2, \sqrt{3}/2) v_0$$

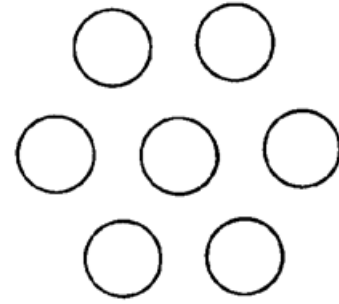
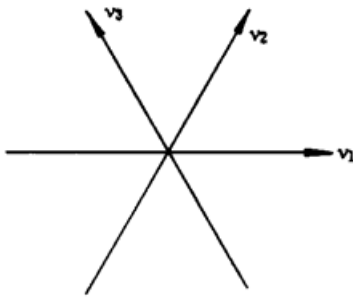


Fig. 5 Two dimensional vector spatial frequencies of sinusoidal gratings      Fig. 6 Zero- and first-order spectra of  $T_m(\mathbf{r})$   $m = 1, 2, 3$  (assume that  $T_m(\mathbf{r})$   $m = 1, 2, 3$  have the same spectrum)

如果采用矩形振幅光栅, 因矩形光栅可以看作是无穷多个频率为该矩形光栅频率  $v_0$  的整数倍的正弦光栅之和(即周期函数的傅里叶级数展开), 所以三个信号经三个矩形光栅分别编码(相乘)、相加后所得的信号  $T(\mathbf{r})$  的傅里叶频谱, 除以上所说的零级和  $\pm 1$  级频谱外, 还有沿各自光栅方向作平移:  $\pm n v_0$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) 的频谱, 称为其高级频谱。

以上所述的相乘、相加和傅里叶变换等数学运算都可以在光学中实现。把一张图像透明片和一个光栅叠置, 其强度透过率便是图像透明片和光栅的强度透过率的乘积; 如果将三幅图像透明片分别通过三个光栅对同一张黑白胶片进行曝光, 且使之工作在 Hurter-Driffield 曲线的线性区并选择合适的  $\gamma$  值, 就有可能实现相加运算, 即经这样处理后的黑白透明片(反转片或正片)的振幅透过率与输入强度(即曝光强度)间呈线性关系<sup>[20, 57]</sup>(但实际很难控制, 一般是非线性或近似线性的)<sup>[19, 20, 24]</sup>。第三个运算即傅里叶变换可以近似地通过薄透镜实现<sup>[56]</sup>。当然还得注意两点: 一是在平行单色光照明下光学傅里叶变换后的空间频谱应是  $\hat{T}(v/\lambda f)$  而不  $\hat{T}(v)$ , 其中  $\lambda$  为照明光波的波长,  $f$  为傅里叶透镜的焦距<sup>[56]</sup>; 二是因为再现时实现光学傅里叶变换的照明光是多色光, 所以还应对波长叠加, 即  $T(\mathbf{r})$  的光学傅里叶变换为<sup>[20, 24, 57]</sup>

$$\int \hat{T}\left(\frac{v}{\lambda f}\right) d\lambda \tag{6}$$

这里没有考虑照明光源的相干特性和它的相对谱强度, 有关内容请参考文献[58]。

最后讨论彩色景物三原色“分开”记录问题

如果采用三次编码方法, 即将三个光栅分别和三原色滤色片叠置, 其透过率分别为  $P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda)$ , 其中  $C_m(\lambda)$  分别是红、绿、蓝三原色滤色片的谱透过率。如果  $P_m(\mathbf{r})$  是矩形光栅, 则  $P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda)$  分别是红、绿、蓝和黑色相间的三个原色光栅, 简单地称之为红黑、绿黑和蓝黑光栅。现在将一彩色景物  $I(\mathbf{r}, \lambda)$  ( $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$ ) 分别经三原色光栅之一编码(用适当白光照明)后得相乘信号

$$I(\mathbf{r}, \lambda) P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) \tag{7}$$

如果将彩色景物分别通过三原色光栅之一, 经三次曝光记录在一张黑白胶片上, 再经光化处理得到其振幅透过率为<sup>[20]</sup>

$$\tau(\mathbf{r}) = k_0 t \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \sigma(\lambda) \sum_{m=1}^3 I(\mathbf{r}, \lambda) P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) d\lambda = k \sum_{m=1}^3 T_m(\mathbf{r}) P_m(\mathbf{r}) \quad (8)$$

其中  $k_0$  为常数,  $t$  为曝光时间,  $k = k_0 t$ ,  $\sigma(\lambda)$  为黑白胶片乳剂的谱灵敏度。

$$T_m(\mathbf{r}) = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \sigma(\lambda) I(\mathbf{r}, \lambda) C_m(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

即是彩色景物在同一张黑白胶片上的三原色分解像。再经过光学傅里叶变换就可以把  $T_m(\mathbf{r})$  的频谱分别沿相应光栅的方向平移  $\pm v_0 \lambda f$  (正弦光栅) 或平移  $\pm n v_0 \lambda f$ ,  $n = 1, 2, \dots$  (矩形光栅)。因为在实现光学傅里叶变换时用多色光照明, 所以还应对照明光波的波长范围作叠加。

若用一次编码方法, 则是通过一张三色光栅经一次曝光就可将彩色景物编码记录在一张黑白胶片上。三色光栅的制作, 同样可以经三个原色光栅三次或一次曝光记录在一张彩色胶片上而得。这三个原色光栅可以是加原色光栅也可以是减原色光栅。例如用加原色光栅分三次曝光记录在彩色胶片上, 经处理后其(正片)强度透过率为相加(已略去常数因子)

$$P(\mathbf{r}, \lambda) = \sum_{m=1}^3 P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) \quad (10)$$

将彩色景物经这个三色光栅一次编码和分别通过三原色光栅经三次编码所得的结果(8)式是一样的。若采用减原色光栅, 而其强度透过率为

$$1 - P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) \quad (11)$$

如果  $P_m(\mathbf{r})$  是矩形光栅, 那么它们分别是青白、品红白和黄白光栅。如果将它们紧密叠置在一起经一次曝光记录在彩色胶片上, 经处理后其(正片)强度透过率为相乘<sup>[20]</sup>

$$\begin{aligned} P(\mathbf{r}, \lambda) &= \sum_{m=1}^3 [1 - P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda)] \\ &= 1 - \sum_{m=1}^3 P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) + \sum_{m>n} P_m P_n C_m C_n - \prod_{m=1}^3 P_m C_m \end{aligned} \quad (12)$$

若

$$C_m(\lambda) C_n(\lambda) = C_m^2(\lambda) \delta_{mn} \quad (13)$$

即相应的红、绿、蓝三原色滤色片透过率曲线互不重叠, 交叉乘积为零, 如图 7 所示, 则

$$P(\mathbf{r}, \lambda) = 1 - \sum_{m=1}^3 P_m(\mathbf{r}) C_m(\lambda) \quad (14)$$

即又化为相加运算。类似地, 将彩色景物  $I(\mathbf{r}, \lambda)$  经这一个三色光栅编码后, 再经光化处理后得

$$\tau(\mathbf{r}) = k [T_0(\mathbf{r}) - \sum_{m=1}^3 T_m(\mathbf{r}) P_m(\mathbf{r})] \quad (15)$$

这里  $T_m(\mathbf{r})$   $m = 1, 2, 3$  同(9)式, 而

$$T_0(\mathbf{r}) = \int \sigma(\lambda) I(\mathbf{r}, \lambda) d\lambda \quad (16)$$

#### (4) 三原色像综合, 即彩色景物再现

只要通过一次光学傅里叶变换, 将  $m$  不同时的  $T_m(\mathbf{r})$  在频谱面上分隔开, 然后将需要的部分(一般是一级频谱)经三加原色滤色窗滤出后再进行一次光学傅里叶变换便可再现彩色景物。这种装置在专利[14~17]、[33~35]和[37, 38]以及许多文献中<sup>[20, 24, 31]</sup>都有描述。凡是懂得一点光学信息处理知识的都会了解, 所以不在此叙述了。至于其它三原色像分解方法和

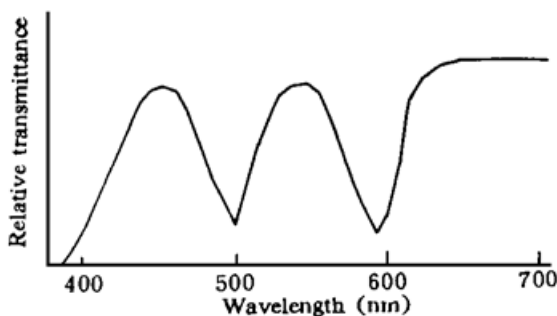


Fig. 7 Spectral transmittances for mutually exclusive color separation filters

相应的再现, 如色屏法或利用三张黑白胶片记录的方法的再现装置(例如称为彩色映画器 Chromoscope 的一种再现装置)可参考文献[12, 13]。

### 3 基本困难

从以上分析可以看出黑白胶片光栅编码彩色摄影术的基本困难是由光栅编码造成的。三次编码和一次编码之间在理论上没有任何本质的差异。由光栅编码造成的困难有:

1) 衍射效率问题, 或光能利用率问题。因为再现时, 若把零级频谱滤掉, 同时把高级频谱都滤掉, 会造成能量的损失。就矩形振幅光栅而言, Ronchi 光栅(其缝宽和间隔相等)的衍射效率最高, 所以用它为编码光栅。采用正弦光栅并不利, 因其衍射效率比 Ronchi 光栅低。

2) 输入强度与编码后的黑白胶片的振幅透过率之间线性关系实际很难控制, 一般都是非线性的, 或者近似线性的。多个光栅编码再加上非线性效应就会导致串色和莫尔条纹的出现。所谓串色问题是: 再现时, 三原色分色像  $T_m(\mathbf{r})$  的一级频谱上可能叠加有乘积项  $T_m(\mathbf{r})T_n(\mathbf{r})$   $m \neq n$  的频谱, 因此无法把  $T_m(\mathbf{r})$  的一级频谱单独分离出来而造成串色<sup>[20]</sup>。因为这种乘积的出现在再现像面上就会出现莫尔条纹, 这是由于乘积项中含有两个编码光栅的叠置的缘故<sup>[20, 32]</sup>。

3) 光栅的存在虽然不会降低系统的速率, 但降低最终分辨率<sup>[20, 21]</sup>, 这主要由于三色光栅的存在, 挡去了许多光能[例如三色光栅(10)中黑黑相加处和三色光栅(12)、(14)中三减色叠置处都呈黑色。显然三色光栅(10)挡掉的光能比三色光栅(12)或(14)要多]。因此要保证一定的分辨率, 必须使用高分辨的黑白胶片。线性性也要求使用高反差的黑白胶片, 而高反差导致颜色过饱和。高反差高分辨率的黑白胶片比普通彩色胶卷要贵得多。

4) 对被拍摄景物的最高空间频率的严格限制。因为被拍摄景物的空间频率很高时, 如果不相应提高编码光栅的空间频率, 那么三原色分色像的一级频谱之间、一个分色像的一级频谱和另一个分色像的高级频谱之间、一级频谱和交叉频谱之间等等都会造成重叠, 这会造成严重串色和莫尔条纹问题。此时若提高编码光栅的空间频率可以解决这些重叠问题, 但制造高频率的三色光栅决非易事。

为了克服以上所述困难, 许多作者想出一些办法。为了提高光能利用率, 从而提高像的亮度, 同时又可减小饱和度, 常用灰光楔引进白色的零级谱的不同数量的光<sup>[20, 21]</sup>, 从这个角度和 3) 中所说的原因, 使用红黑、绿黑和蓝黑三个光栅相加而成的三色光栅是不利的。为了进一步提高光能利用率, 有人提出将编码记录后的胶片经漂白处理形成位相型透明片<sup>[31, 32]</sup>, 因为位相型透明片衍射效率高, 以达到减少和消除非衍射光的目的, 也可用这种位相型透明片来减弱串色效应。

通过适当选择三色光栅中三个光栅的频率和取向也可以达到减轻由于非线性效应带来的串色和莫尔条纹问题<sup>[20, 32, 59]</sup>。实际上用光栅编码的方法和电子学中用时间信号调制载波的思想是类似的。在光学中, 除振幅调制、位相调制和频率调制外, 还有一个特殊的调制, 即用取向不同的光栅进行调制, 称作 Theta 调制<sup>[60]</sup>。从 1899 年及以后的一段时间内这种光栅编码技术常称为“用图像来调制光栅”, 而不是更以后的“用光栅编码图像”, 就是沿袭电子学中所用语言的缘故。

编码光栅的设计在编码、解码过程中起很大作用, 所以有人对其进行了较多的研究, 例如 P. F. Mueller 的分别在 1972、1973 和 1974 年被授予的专利[33~35]中除三色线光栅外, 还详细地给出了各种形式的镶嵌式三色光栅, 并讨论了如何通过不同形式的编码器来控制不同颜色信息在空间频谱上的分布从而为彩色景物的再现提供各种途径以便克服上面提到过的若干弊病。也有人事先将光栅作为潜像记录在感光乳胶上, 但需用三层乳胶, 每一层只对三



原色之一敏感<sup>[40]</sup>。关于胶片特性对光栅编码彩色摄影术中色调再现的作用,有人也进行过专门讨论<sup>[61, 62]</sup>。也有人用热塑料代替黑白胶片来进行光栅编码彩色摄影<sup>[14~16, 63, 64]</sup>,并为此设计了新的彩色投影系统<sup>[63, 64]</sup>。

## 4 结论和讨论

从以上讨论可以得出以下结论:

1) 用黑白胶片光栅编码进行彩色摄影并再现的思想和技术早在 1899 年就有了,已将近 100 年了。

2) 用一个三色光栅一次曝光编码的方法和技术,包括专用照相机,也早在二十世纪六十年代就有了,并进行过成功的实验。在这方面,从那时至今还没有什么比较大的进展。

3) 在这个领域,出现了两个萧条时期。在这期间,光学界很少有人对之感兴趣。由于技术本身所固有的一些很难克服的弱点,使得它在彩色摄影应用方面,无论从质量还是从价格,无法和彩色胶片相匹敌。所以按目前状态,它在彩色摄影方面不会有很大用处,更谈不上什么大的经济价值。

4) 这个技术的确也有过一段兴旺时期,那是在二十世纪六、七十年代。凡是读过 Mueller 的文章<sup>[20]</sup>的都应该知道这一点。他在文章的总结部分明确指出,这个技术在军事上和电视新闻报道中都已成功地进行了现场试验。他用的是“现在完成时态”,不妨在这里录下这段原文: “Successful field tests of this color method have been conducted for both military applications and television news.” 该文还指出只需将普通照相机在机械方面作较小的改造就可以实施这个技术。Macovski 在专利[14]中早已明确指出过利用三色光栅一次编码记录的技术已被成功地运用,其原文是 “In an embodiment of the invention, which was constructed and successfully operated, ...”

这个技术在国内的名称,包括专利名称相当多。但因其主要思想是利用衍射分色,用图像调制光栅,以及后来的用光栅对图像进行编码和解码,所以一开始使用诸如“彩色摄影的衍射方法”<sup>[21]</sup>,后来用“在已调制光栅中的图像编码”<sup>[25]</sup>和“彩色信息的编码和解码”<sup>[31]</sup>。Mueller 称它为“Total Optical Color”,简称 TOC<sup>[20]</sup>,而又按他当时所在公司的名称 Technical Operations 被称为“Technical Operations Color”,简称也是 TOC<sup>[21]</sup>。“用黑白底片作彩色摄影”这个名称容易使外行人感到新奇,但容易误导,也不能反映这个技术的实质。因为用黑白胶片作彩色摄影的方法很多,除用光栅编码外,还有诸如色屏法,彩虹全息法<sup>[65]</sup>,还有曾获诺贝尔奖的干涉法等等。外国专利所用名称使得它们归属国际分类号: G02b 5/22, G03b 33/00, G03b 33/14, G03C 7/16 和 H0 4n 9/06 等等。这些专利差不多都是在 1973 年前被授予专利权的。但文献代查报告[66]中要求查的年份是 1974~1983 年,正好和国际上有关专利的公布时间完全错开,这样要查到这些外国专利就很难了,而且要查的课题又是“用黑白底片作彩色摄影”<sup>[66]</sup>,那就使得查找难上加难了。

最后还指出一点:在参考文献[29]第 124 页,该文作者承认“Mueller 介绍了一种彩色网屏,用它只需一次曝光即可在黑白感光片上记录下彩色图像的信息,但是他没有给出相应的实验结果。”在专利[30]中,该专利作者在叙述已有技术现状时也说:“该文(指文献[20],作者注)设想将一种三补色(青、品、黄)的彩色网屏置于黑白感光片前,对彩色图像曝光得到编码片,将编码片放在光学处理系统中,通过频谱平面的彩色滤波,在输出平面再现原彩色图像。不过该文仅是用模拟的办法论证他的设想和理论,他是用三次曝光编码的方法来等效彩色网屏的作用,并没有制作出彩色网屏,更没有利用彩色网屏在黑白感光片上实时地拍摄彩

色景物; …。”从这两段叙述中可以看出, 假定文献[29]和专利[30]的作者对用三色光栅(即是上面提到过的彩色网屏, Mueller 文章[20]中的原文是 Tricolor grid)经一次编码来实现用黑白感光片拍摄彩色景物的很多有关专利一概不知, 假定他们对 Mueller 的文章[20]也没有仔细阅读或者没有读懂, 或者读懂了没有进一步去查有关文献, 在这些假定之下, 文献[29]和专利[30]的作者也只声称其贡献只是制作了三色光栅并利用它在黑白感光片上进行实时拍摄彩色景物, 而在思想上、原理上以及理论上都没有任何贡献。但到了 1991 年他们声称的贡献一下子成了“国际首创”和“异常重大的技术突破,”这真令常人惊诧!

### 参 考 文 献

- [1] R. W. Wood, An application of the diffraction grating to colour-photography. *Phil. Mag.*, April, 1899, **47**: 368~ 372
- [2] R. W. Wood, The diffraction process of colour photography. *Nature*, 1899, **60**(1548): 199~ 201
- [3] R. W. Wood, Recent improvements in the diffraction process of colour photography. *Nature*, 1904, **70** (1825): 614~ 616
- [4] T. Thorp, Improvements in the method of and means for rendering photographic and other pictures of objects in their natural or in other desired colours. *English Patent*, 11466, 1899
- [5] J. Guild, *The Interference System of Crossed Diffraction Gratings*. London, Oxford University Press, 1956
- [6] H. E. Ives, Improvements in the diffraction process of colour photography. *Phys. Rev.*, 1906, **22**(6): 339~ 344
- [7] H. E. Ives, Improvements in the diffraction process of colour photography. *Brit. J. Photo.*, 1906, August 3: 609~ 612
- [8] C. Bocca, Inethod for superposing partial images of polychromatic selection and progetcing the m to obtain an image in natural colors. *U. S. Patent*, 2,050,417, Aug. 11, 1936
- [9] C. E. K. Mees, Kodachrome-a new 16 mm. color process. *Camera Craft*, May, 1935, **42**: 237~ 241
- [10] E. R. Davies, The Kodachrome process of 16 mm. color kinematography. *The Photographic Journal*, April, 1936, **76**: 248~ 253
- [11] G. L. Johnson, *Photography in Colours.*, London, George Routledge & Sons, 1914
- [12] R. M. Evans, W. T. Hanson, Jr., W. L. Brewer, *Principles of Color Photography*. New York, John Wiley & Sons, 1953
- [13] 宫本五郎, 奥泽和夫, (李直译), 彩色照相. 北京, 中国电影出版社, 1962
- [14] A. Macovski, Photography using spatial filtering. *U. S. Patent*, 3,504,606, April 7, 1970
- [15] A. Macovski, Photographic coding-decoding system. *U. S. Patent*, 3,533,340, Oct. 13, 1970
- [16] A. Macovski, Colored light encoding filter. *U. S. Patent*, 3,585,284, June 15, 1971
- [17] T. A. Smith, Method for preparing color separation printing negatives. *U. S. Patent*, 3,488,190, Jan. 6, 1970
- [18] A. Macovski, Monochrome photography system for color television. *U. S. Patent*, 3,378,633, April, 16, 1968
- [19] P. F. Mueller, Linear multiple image storage. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(2): 267~ 273
- [20] P. F. Mueller, Color image retrieval from monochrome transparencies. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10): 2051~ 2057
- [21] P. N. Slater, Chapter 6 *Photographic Systems for Remote Sensing*, in *Manual of Remote Sensing, Vol.1 Theory, Instruments and Techniques.* F. J. Janza ed. Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry, 1975
- [22] 辻内顺平, 村田和美, (谈恒英译), 光学信息处理. 北京, 机械工业出版社, 1985 年 8 月
- [23] L. Levi, *Applied Optics, A Guide to Optical System Design, Vol. 2*, New York, John Wiley & Sons, 1980
- [24] F. T. S. Yu, White light processing technique for archival storage of color films. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(14): 2457~ 2460
- [25] K. Biedermann, Image encoding in modulated grating from 1899 to 1970. *Opt. Acta.*, 1970, **17**(8): 631~ 635
- [26] 我国彩色摄影技术首创奇迹, 黑白胶片作彩色摄影获成功. 人民日报头版, 1991 年 12 月 2 日

- [27] 一项全新的彩色摄影技术在中国崛起, 黑白胶片可作彩色摄影. 光明日报头版, 1991年12月2日
- [28] 1991年中国十大科技新闻揭晓, 南大母国光等首创黑白胶片作彩色摄影技术入选. 天津日报头版, 1992年1月1日
- [29] 母国光, 王君庆, 方志良等, 用三色光栅和黑白感光胶片拍摄彩色景物. 仪器仪表学报, 1983, 4(2): 124~ 130
- [30] 母国光, 方志良, 王君庆等, 用黑白感光片作彩色摄影技术. 中国专利, 审定号 CN 1003811B, E28, 中国审定, 1989年4月5日
- [31] A. Macovski, Encoding and decoding of color information. *Appl. Opt.*, 1972, 11(2): 416~ 420
- [32] F. T. S. Yu, X. X. Chen, S. L. Zhuang, Progress report on archival storage of color films utilizing a white-light processing technique. *J. Opt. (Paris)*, 1985, 16(2): 59~ 65
- [33] P. F. Mueller, Optical processing of information including synthesis by complex amplitude addition of diffraction spectra. *U. S. Patent*, 3,664,248, May 23, 1972
- [34] P. F. Mueller, Spectral zonal information storage and retrieval. *U. S. Patent*, 3,719,127, March 6, 1973
- [35] P. F. Mueller, Spectral zonal information storage and retrieval. *U. S. Patent*, 3,820,878, June 28, 1974
- [36] R. Grousson, S. Mallick, Multiple image storage using a crossed grating. *Nouv. Rev. Optique*, 1976, 7(2): 77~ 85
- [37] R. Grousson, R. S. Kinany, Multicolor image storage on black and white film using a crossed grating. *J. Opt. (Paris)*, 1978, 9(6): 333~ 339
- [38] H. Heckscher, P. F. Mueller, Optical apparatus and methods for viewing or displaying images. *U. S. Patent*, 3,561,859, Feb. 9, 1971
- [39] G. B. Parrent, Jr., P. F. Mueller, Apparatus and methods for displaying or viewing educational materials or the like. *U. S. Patent*, 3,620,611, Nov. 16, 1971
- [40] C. N. Kurtz, F. C. Eisen, G. C. Higgins, Color television from monochrome transparencies using modulated latent-image gratings. *Photo. Sci. Eng.*, 1971, 15(5): 343~ 355
- [41] Soo Young Chai, L. H. Enloe, A. B. Larsen, Resolution control of the three color images in a single pick-up tube color camera system. *U. S. Patent*, 3,530,233, Sept. 22, 1970
- [42] A. Macovski, Spatial filter color encoding and image reproducing apparatus and system. *U. S. Patent*, 3,585,286, June 15, 1971
- [43] W. J. Hannan, Color encoding system utilizing two filters alternately for minimizing effects of image misregistration and image pickup device lag. *U. S. Patent*, 3,647,945, March 7, 1972
- [44] A. B. Larsen, T. P. Sosnowski, R. L. Townsend, Jr., Single-tube color cameras with optical spatial frequency filters. *U. S. Patent*, 3,681,519, Aug. 1, 1972
- [45] T. F. Hanlon, Color information on black and white film. *U. S. Patent*, 3,715,461, Feb. 6, 1973
- [46] A. Macovski, Color television encoding and decoding system. *U. S. Patent*, 3,908,193, Sept. 23, 1975
- [47] F. T. S. Yu, 母国光, 庄松林, 用白光信息处理作褪色透明片的彩色复原. 物理学报, 1981, 30(6): 841~ 848
- [48] 王之江主编, 光学技术手册(上册). 北京, 机械工业出版社, 1987年11月
- [49] D. L. MacAdam, *Color Measurement: Theme and Variations*, 2nd rev. ed. Berlin, Springer-Verlag, 1985
- [50] G. Lippmann, Photography in colors. *The American Journal of Photography*, 1891, 12: 180~ 183
- [51] G. Lippmann, Coloured photography of the spectrum. *The photographic Journal*, 1892, 17: 85~ 89
- [52] Nobel Committees for Physics and Chemistry, The Royal Swedish Academy of Sciences, *List of the Nobel Prize Winners 1901 ~ 1987*. Uppsala Almqvist & Wiksell Tryckeri, 1988
- [53] H. D. Murry (editor), *Colour in Theory and Practice*. London, Chapman & Hall, 1952
- [54] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林等, 色度学. 北京, 科学出版社, 1979年10月
- [55] 陆振球, 李正明, 信息光学与数学(第一编). 1981年
- [56] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco, McGraw-Hill, 1968
- [57] F. T. S. Yu, T. H. Chao, S. L. Zhuang, Polychromatic processing technique for color image transparencies. *Appl. Opt.*, 1980, 19(12): 1887~ 1889
- [58] F. T. S. Yu, *White-Light Optical Signal Processing*. New York, John Wiley & Sons, 1985
- [59] 张永林, 用黑白胶片拍摄彩色像. 应用激光, 1982, 2(5): 15~ 17, 14
- [60] J. D. Armitage, A. W. Lohmann, Theta modulation in optics. *Appl. Opt.*, 1965, 4(4): 399~ 403
- [61] O. Bryngdahl, Image polarity in carrier-frequency photography. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60(12):

1698~ 1700

- [62] K. Biedermann, Tone reproduction and reversal in carrier-frequency photography. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(11) : 1739~ 1443
- [63] W. E. Glenn, New color projection system. *J. Opt. Soc. Am.*, 1958, **48**(11) : 841~ 843
- [64] W. E. Glenn, Thermoplastic recording. *J. Appl. Phys.*, 1959, **30**(12) : 1870~ 1873
- [65] F. T. S. Yu, Anthony Tai, Hsuan Chen, Archival storage of color films by rainbow holographic technique. *Opt. Commun.*, 1978, **27**(3) : 307~ 310
- [66] 天津市科学技术情报研究所, 文献代查报告(委托单位: 南开大学物理系现代光学研究室, 课题名称: 用黑白底片作彩色摄影, 年份: 1974~ 1983). 编号 840153, 1984 年 6 月 28 日

## Grating Encoded Color Photography with Black-and-White Film

Yan Fang

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 21 October 1996; revised 12 February 1997)

**Abstract** The basic ideas and technique for recording using grating and retrieving full color images with panchromatic black-and-white film were presented in 1899. Since then, this technique has undergone much suffering. At the early stage, some authors used color images to modulate spatial carriers, i. e., gratings, which is analogous to the method of using temporal signals to modulate temporal carriers in electronics. After ten years, few people paid attention to this field of research. Things remained like that for nearly half a century. In this period, a comparatively important result in this respect was recoding color information on a black-and-white film with three colored filters and three gratings of different azimuthal orientations in three exposures and reconstructing the transparency thus obtained into a full color image. In the sixties, interest in this technique was aroused again and some important achievements appeared, including a snapshot method for color encoding using a tricolor grating and design for and manufacture of cameras implementing this snapshot method. Successful field tests of this color method was conducted for both military applications and television news. Another important achievement in the late sixties was that the importance of maintaining a linear relation between total input exposure and amplitude transmittance of the processed film during recording was realized and analyzed in detail. And good decoding systems were put forward based on Fourier optics. But since the early eighties, especially the mid eighties, almost nobody has taken an interest in this field of research and no important progress has been made. This technique's many practical drawbacks and the development of the highly practical tripack color films make this technique almost obsolete. Except that it still has some applications in multiple image storage and multispectral photography, it is no match for modern color photography in both quality and price.

**Key words** encoding through grating with black-and-white film, encoding and decoding of color information, diffraction color photography, carrier frequency photography.