

# 二维彩色复物体的记录和重构

王能鹤

庄松林

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

(上海光学仪器研究所)

## 提 要

本文叙述了一种记录二维彩色复物体的方法,照明系统采用三色的编码光源。信号编码装置实际上是一只消色差干涉仪。复原系统中使用白光点源,最后列举了实验结果。

## 一、引 言

许多生物学和病理学的切片标本是一类具有色泽的复物体,由于切片的厚度可以做得很薄,因此,可以把这些标本视为彩色的二维复物体。从光学的观点来看,这类样品可以描述为

$$O(x, y) = \sum_{i=1}^3 a_i(x, y) \exp i\phi_i(x, y), \quad (1)$$

其中,  $a_i(x, y)$  和  $\phi_i(x, y)$  表示第  $i$  个基色的振幅和位相,  $i=1, 2, 3$  代表三个基色(红、绿、蓝)。记录这类物体和按本色重构它们是具有一定实际意义的事情。

记录彩色复物体的方法还不多<sup>[1]</sup>, 本文介绍的方法具有如下三个特点:

(1) 记录用的装置是常用的部分相干光处理系统。因此, 记录二维彩色复物体的数据片具有这类系统的所有优点, 例如相干噪声低等。

(2) 三种基色用三组不同的条纹系编码, 但是, 这和用 Ronchi 光栅接触印刷编码方法不同<sup>[2]</sup>, 在那种方法中, 只能记录强度透过率, 位相信号是完全失掉的, 而本文描述的方法可以记录复信号。

(3) 我们的数据片相当于“像全息图”, 这个全息图可以用白光点源重构, 并且重构象具有原来物体的自然色。

## 二、记录方法和实验装置

在任何相干成像系统中, 除物面和像面以外的任何地方, 放一只正弦光栅, 则可以获得零级,  $-1$  级和  $1$  级三个像。一般说来, 这三个像是不共面的。但是, 如果在  $4f$  成像系统的两个变换透镜之间插入一个正弦光栅, 则只要透镜的像差在足够大的视场内平衡得足够好, 三个像基本上是共面的。因此, 为了使三个像的重叠部分有足够衬度的干涉条纹, 时间相干性的要求是不高的。这为使用准单色光源提供了可能性。

在准单色点源的准直光照明下, 若正弦光栅足够精确地放在谱平面上, 则在输出平面可

以实现 +1 级和 -1 级像之间的相减<sup>[3]</sup>。当把正弦光栅离开谱面放置时，这两个级的物体的波面分别向两个方向发生了倾斜，因此在重迭区域，可以获得已调制的信号，调制频率与光栅至谱平面的距离有关。当光栅紧靠变换透镜时，调制频率达到最大。若把物平面适当分为两个区域，一个放置输入信号，另一个空着作为参考光束，这个装置可以记录黑白的复物体(图 1)。如果正弦光栅的线条与  $y$  轴平行，则在  $x-z$  平面内，光栅起着汇合两个被干涉的光束的作用。即在  $x-z$  平面内，系统有较大的视场和孔径角。但在  $y-z$  平面内，仅用了较小的视场和孔径角。这个余下的孔径角可以作为分光照明用。从下一节的分析可知，实际上这是一只消色差干涉仪，因此，不同颜色的照明和不同颜色的物体信号将会有相同的条纹编码。于是，在重构的时候，会发生下列现象：(1) 不同的颜色不能区分；(2) 不同颜色的物体各部分之间发生相对位移。但若用不同空间频率的组合光栅(图 2)代替一只光栅，在光源平面上，用三个点源从三个不同的垂直方向照明物体，则上述两个问题将同时得到解决。

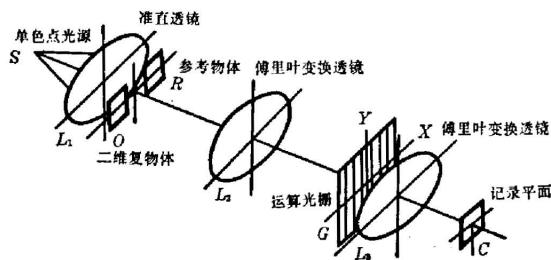


图 1 记录二维复物体的实验装置

Fig. 1 Equipment for recording a 2-D complex object

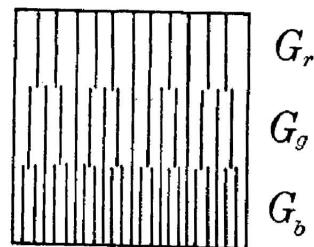


图 2 运算光栅  $G_b, G_g, G_r$  分别对应于蓝、绿、红三种颜色

Fig. 2 Operating grating,  $G_b, G_g, G_r$  are for blue, green and red respectively

若系统的视场为  $H$ ，为了使物平面上两个区域的 +1 和 -1 级像重迭，又能与它们的零级分离，物体的有效大小为  $(H/3) \times H$ ，而复合光栅的空间周期为

$$d_i = \lambda_i f / H \quad (i=1, 2, 3), \quad (2)$$

其中  $\lambda_i$  是三种准单色光的平均波长， $d_i$  为对应于三个基色的光栅的三个部分周期。

光源编码的技术曾经被成功地用在干涉仪和减法系统中<sup>[3]</sup>。同样，在记录复物体的装置中，我们也可以用编码面源代替点源。可以证明(见下节)，编码光栅频率应等于运算光栅(图 2)的整倍数。

图 3 是照明系统的示意图，其中， $S$  是白光面源， $F_B, F_G, F_R$  分别为让三种基色通过的干涉滤光片。 $L_1$  将  $F$  的像成在编码光栅  $M_B, M_G, M_R$  上， $L_3$  是准直透镜。为了使三种颜色的光均匀照明同一物体，必须使用一块场镜  $L_2, L_2$  和  $L_3$  把  $L_1$  成像在物体上。

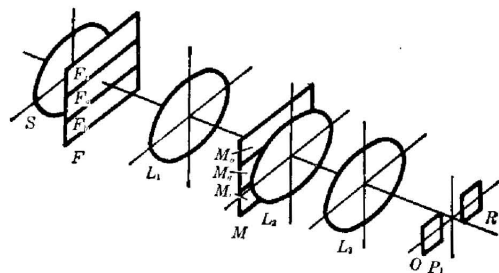


图 3 照明系统

Fig. 3 Illuminating system.

### 三、分 析

图 4 是记录彩色二维复物体的光学系统图。本节，我们用部分相干理论分析该系统的

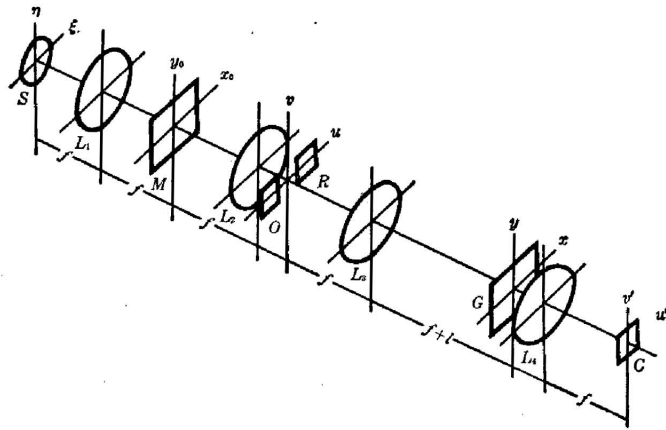


图 4 实验原理图

Fig. 4 Diagram of the experimental principle

S—extended source;  $L_1$ —condenser; M—encoding mark;  $L_2$ —collimeter;  $L_3, L_4$ —Fourier transformation lens; G—operating grating; O—object; R—reference; C—record.

性能和必须满足的条件

设 S 是均匀发光面源, S 的大小约为  $\omega = 10 \text{ mm}$  (例如高压汞弧灯),  $L_1$  为聚光镜, 在我们的实验中,  $L_1$  的焦距约为 100 mm, 因此, 在编码光栅 ES 上, 相干函数的大小约为  $4 \mu\text{m}$ , 而编码光栅是一个周期约为  $25 \sim 30 \mu\text{m}$  的 Ronchi 光栅。可见光栅的各条刻线之间是不相干的, 而刻线在宽度方向是相干的, 因为每根刻线内部的相干性只影响互相干函数的慢变化包迹, 粗略地说, 我们把刻线内部也看作是完全不相干的, 以每一刻线上的光强度为强度单位, 则编码源 ES 可以记作

$$I(x_0) = \sum_{n=-N}^N \delta(x_0 - nD) \text{rect}(x_0/d), \quad (3)$$

这里 rect 表示矩形函数,  $\delta$  是狄拉克函数,  $d$  为刻线的宽度,  $D$  是光栅周期。在  $P_1$  平面上的互强度函数  $J(u_1, u_2)$  是 (3) 式的傅里叶变换

$$J(u_1, u_2) = \frac{d}{f\lambda} \sin c \left[ \frac{d(u_1 - u_2)}{f\lambda} \right] \sum_{n=-N}^N \exp \left[ -i \frac{2\pi}{f\lambda} (u_1 - u_2) nD \right], \quad (4)$$

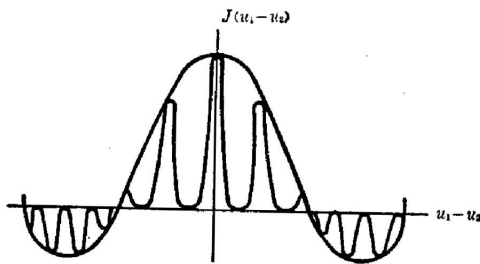


图 5  $P_1$  平面上的互强度函数

Fig. 5 The mutual intensity at the plane  $P_1$

其中  $\sin cx = (\sin \pi x / \pi x)$ , 求和  $\sum_{n=-N}^N \exp[-i(2\pi/f\lambda)(u_1 - u_2)nD]$  与普通光栅衍射相当, 因此, 在  $P_1$  平面上的互强度函数的形状大致如图 5 所示。

设第  $i$  基色的复透过率为  $t_i(u)$ , 物体位于  $L_3$  的前焦平面上, 光栅 G 放在  $L_3$  后焦面以后  $l$  处(图 4), 则光栅 G 前表面上的互强度函数为(设  $L_1, L_2, L_3, L_4$  的焦距相等, 均为  $f$ )

$$J^{(-)}(x_1, x_2) = \frac{1}{f\lambda} \iint du_1 du_2 \left\{ J(u_1, u_2) t_i(u_1) t_i^*(u_2) \exp \left[ i \frac{k}{2f} (u_1^2 + u_2^2) \right] \right. \\ \left. \times \exp \left[ -i \frac{k(f+L)}{2} \left( \frac{u_1^2 - u_2^2}{f^2} - \frac{2u_1x_1 - 2u_2x_2}{f^2 + fL} \right) \right] \right\}$$

$$= \sum_{n=-N}^N \iint du_1 du_2 \left\{ \sin c \frac{d(u_1 - u_2)}{\lambda f} \exp \left[ -i \frac{2\pi}{f\lambda} (u_1 - u_2) n D \right] \cdot t(u_1) \right. \\ \left. \times t^*(u_2) \exp \left[ -i \frac{kL}{2f^2} (u_1^2 - u_2^2) \right] \exp \left[ -i \frac{k(u_1 x_1 - u_2 x_2)}{f} \right] \right\}. \quad (5)$$

由于实际用的光栅是位相型的,但是,我们关心的只是 +1 级和 -1 级,因此为了简单起见,在计算过程中以振幅型正弦光栅为例子,于是,在光栅  $G$  的后表面上的互强度  $J^+(x_1, x_2)$  可以分成如下 9 项

$$J^+(x_1, x_2) = J^-(x_1, x_2) \left\{ 1 + \frac{c}{2i} \exp(i2\pi\omega_0 x_2) - \frac{c}{2i} \exp(-i2\pi\omega_0 x_2) \right. \\ \left. + \frac{c}{2i} \exp(i2\pi\omega_0 x_1) - \frac{c^2}{4} \exp[i2\pi\omega_0(x_1 + x_2)] + \frac{c^2}{4} \exp[i2\pi\omega_0(x_1 - x_2)] \right. \\ \left. - \frac{c}{2i} \exp(-i2\pi\omega_0 x_1) + \frac{c^2}{4} \exp[-i2\pi\omega_0(x_1 - x_2)] - \frac{c^2}{4} \exp[-i2\pi\omega_0(x_1 + x_2)] \right\}, \quad (6)$$

其中  $\omega_0$  是光栅的空间频率。

类似地,在像平面  $P_2$  的互强度函数为

$$J(u_1, u_2) = \exp \left[ i \frac{kL}{2f^2} (u_1^2 - u_2^2) \right] \iint dx_1 dx_2 J^+(x_1, x_2) \exp \left[ -i \frac{k}{f} (x_1 u_1 - x_2 u_2) \right], \quad (7)$$

(7) 式包含 9 项,当我们只关心 +1 级和 -1 级重迭部分的信号时,只有下面两项是有意义的

$$T_{\text{em}5} = -\frac{c^2}{4} \sum_n \sin c(2d\omega_0) \exp(-i4\pi\omega_0 n D) \\ \times t(u' + f\lambda\omega_0) t^*(u' - f\lambda\omega_0) \exp \left( -i4\pi \frac{l}{f} \omega_0 u' \right), \quad (8)$$

$$T_{\text{em}9} = \frac{c^2}{4} \sum_n \sin c(2d\omega_0) \exp(-i4\pi\omega_0 n D) \\ \times t(u' - f\lambda\omega_0) t^*(u' + f\lambda\omega_0) \exp \left( i4\pi \frac{l}{f} \omega_0 u' \right), \quad (9)$$

其中  $c$  为常数。因此,像平面上有意义的信号为

$$I(u') = -\frac{c^2}{4} \sin c(2d\omega_0) \left\{ \sum_{n=-N}^N \exp \left[ -i4\pi\omega_0 \left( nD + \frac{l}{f} u' \right) \right] t(u' + f\lambda\omega_0) \right. \\ \left. t^*(u' - f\lambda\omega_0) + \sum_{n=-N}^N \exp \left[ i4\pi\omega_0 \left( nD + \frac{l}{f} u' \right) \right] t(u' - f\lambda\omega_0) t^*(u' + f\lambda\omega_0) \right\}. \quad (10)$$

令  $t(u) = |t(u)| \exp[i\phi(u)]$ , 则 (10) 式成为

$$I(u') = -\frac{c^2}{2} \sin c(2d\omega_0) |t(u' + f\lambda\omega_0)| |t(u' - f\lambda\omega_0)| \\ \times \sum_{n=-N}^N \cos \left[ \phi(u' + f\lambda\omega_0) - \phi(u' - f\lambda\omega_0) - 4\pi\omega_0 \left( nD + \frac{l}{f} u' \right) \right]. \quad (11)$$

现将上述方程中的因子说明如下:

(1) 因子  $|t(u' + f\lambda\omega_0)| |t(u' - f\lambda\omega_0)|$  表明由于光栅  $G$  的一级衍射,经过  $L_4$  的变换之后,物体位置的移动为  $f\lambda\omega_0$ 。因此,为了使编码不发生畸变,应满足  $f\lambda\omega_0 = \text{常数}$ ,即对于三个基色,应满足

$$f_B \lambda_B \omega_{0B} = f_G \lambda_G \omega_{0G} = f_R \lambda_R \omega_{0R} \quad (12)$$

对  $B$ 、 $G$ 、 $R$  的不同值表示纵向色差, 对实际使用的透镜 ( $f \sim 350$  mm),  $f_R - f_G \approx 0.7$  mm, 组合光栅  $G$  是按上述要求专门制作的。

(2) 求和因子  $\sum_{n=-N}^N \cos[\phi(u' + f\lambda\omega) - \phi(u' - f\lambda\omega) - 4\pi\omega_0(nD + \frac{l}{f}u')]$  表示编码条纹的结构基频为

$$\omega = (l/f)2\omega_0 \quad (13)$$

并且, 为了使编码源的不同刻线的位移不影响条纹衬度, 要求光栅  $G$  的频率  $\omega_0$  与编码源的周期  $D$  之间满足

$$\omega_0 = m/2D, \quad (14)$$

其中  $m$  为整数。

(3) 因子  $\sin c(2d\omega_0)$  表示条纹的衬度, 所以, 为了得到较高的条纹衬度, (14) 式中  $m$  应尽可能取较小的值, 但是  $\omega_0$  与系统负载的信息容量成正比。我们取中肯值  $m=2$ , 即光栅  $G$  的频率与编码源  $ES$  是很好匹配的。

## 四、实验和结果

为了简单起见, 我们用两种基色(红和绿)作了实验, 对于红色 ( $6328 \text{ \AA}$ ), 编码光栅和运算光栅的周期为  $29 \mu\text{m}$ , 对于绿光 ( $5461 \text{ \AA}$ ), 编码光栅和运算光栅的周期为  $25 \mu\text{m}$ , 所有的准直和傅里叶变换透镜的焦距为  $350$  mm (纵向色差在  $1$  mm 左右), 这些数据是根据 (10) 式决定的。为了得到较好的条纹衬度, 编码光栅和运算光栅的匹配精度要求很高, 在本实验中, 运算光栅是从编码光栅复制而成的, 并且用 R-10 漂白处理<sup>[5]</sup>, 一级光的衍射效率在  $10\%$  以上, 在实验装置中, 运算光栅和编码光栅的转动调整精度在  $1'$  弧度之内。

在实验过程中, 条纹的定域问题值得注意, 对于单色点源来说, 物光和参考光之间的干涉是不定域的, 在像平面上, 凡是物体的  $+1$  级和参考光的  $-1$  级光重叠的区域, 一定能观察到条纹, 但在编码面源照明下, 物光与参考光之间的干涉条纹是定域的, 在本实验的条件下, 定域的深度约  $2$  mm, 因此, 在一般情况下, 条纹和像是不共面的, 这时, 可以调节编码光栅的纵向位置, 使条纹定域区域移向像面, 对于系统的纵向色差, 我们只能取中间值, 使红像和绿像同时清楚, 且条纹的衬度最好。

分析记录片, 我们可以知道, 红色的复信号是以约为  $29 \mu\text{m}$  周期的干涉条纹为载波的位相调制和振幅调制的信号, 而绿色的复信号是以约  $25 \mu\text{m}$  为周期的干涉条纹为载波的调制信号, 而黄色的复信号则是两种条纹相加的调制信号, 因此, 若用红色与绿色两种单色光重构物体, 则在记录片的傅里叶谱面上, 一级象有四个点, 其中红光被  $29 \mu\text{m}$  周期的条纹衍射的点和绿光被  $25 \mu\text{m}$  周期的条纹衍射的点处在同一位置, 因此, 用狭缝取出这两个点, 再作一次傅里叶变换, 即可得到红、绿、黄三种颜色的重构像, 实际上, 我们是用白光点源及图 (6) 的简单装置得到重构像的, 这时,  $29 \mu\text{m}$  和  $25 \mu\text{m}$  两组条纹分别形成两条色带, 而  $29 \mu\text{m}$  周期的条纹形成的色带中红色区域与  $25 \mu\text{m}$  周期的条纹形成的色带中绿色的区域处在同一位置, 因此, 用狭缝滤出这个区域便能得到自然色彩的重构像。图 7 是 PSU 三个字的重构

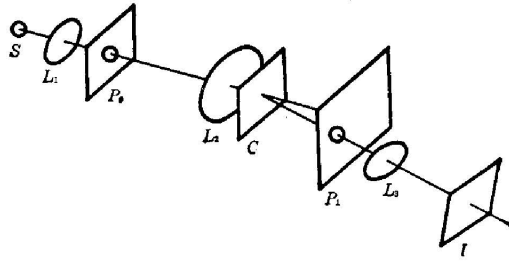


图 6 白光重构光路

Fig. 6 Reconstruction set-up by using a white light point source

$S$ —white light point source;  $L_1$ —condenser;  $P_0$ —pinhole;  
 $L_2$ —transform lens;  $C$ —record of 2-D complex object;  
 $P_1$ —pinhole;  $L_3$ —imaging lens;  $I$ —image



图 7 PSU 的重构像

Fig. 7 Reconstruction image of PSU

像,其中,P呈红色,S呈绿色,U呈黄色,可见,结果是相当好的。

## 参 考 文 献

- [1] E. N. Leith, G. J. Swanson; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 17 (1 Sep), 3081.
- [2] 杨振寰,庄松林,赵天欣,《物理学报》,1981, **1**, No. 1 (Jan), 13.
- [3] S. T. Wu, F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 3 (Dec), 4082.
- [4] J. C. Wyant; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 1 (Jan), 202.  
 F. T. S. Yu, S. L. Zhuang, S. T. Wu; *Appl. Phys. (B)*, 1982, **27**, No. 1, 99.
- [5] B. J. Chang, K. Winick; *SPIE's Los Angeles Tech. Symp.*, 1980, **215** (Feb) 4~7.

## Recording and reconstruction of a 2-D color complex object

WANG NENGLE

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ZHUANG SONGLIN

(Shanghai Optical Instrument Research Institute)

(Received 4 September 1982, revised 22 June 1983)

## Abstract

In this paper a new technique for recording 2-D color complex object is described. The optical system is actually an achromatic interferometer. A white light source is used for both recording and reconstruction process. A simple experiment result is also presented here.