

合成多狭缝的彩虹消色像全息术

于美文 郭春燕 张静方

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

提要: 本文提出一种合成多狭缝彩虹消色像全息术, 讨论了消色条件和由于记录时二次曝光产生的像点模糊, 并给出物光波面转角的容限。

关键词: 彩虹全息术, 两步法合成狭缝彩虹全息术, 消色像全息术

Synthetic multi-slit rainbow achromatic image holography

Yu Meiwen, Guo Chunyan, Zhang Jingfang

(Beijing Institute of Technology, Beijing)

Abstract: A novel synthetic multi-slit rainbow achromatic image holography is proposed. Some discussion on the achromatic condition and the image blur caused during two-times exposure when recording is also made. Finally the limits to the turning angle of object wave-surface are given.

Key words: rainbow holography, two-steps synthetic rainbow holography, achromatic image holography

一、引 言

消色像全息术的出现为黑白物体的三维显示提供了条件, 它可以逼真地再现原本是黑白物体的真实面貌, 给人更直观的感觉。

目前的消色像全息术主要有: 像面全息术、光栅补偿法^[1]、彩虹消色全息法^[2]、线散射参考光彩虹全息法^[3]、多物光消色彩虹全息术等。像面全息图再现像的景深很小, 只有几 mm; 光栅补偿法是一种平均补偿法^[4], 因而它的视场及景深都有一定的限制, 同时它的观察范围及光能利用率都没有彩虹消色全息来得大, 在保持彩虹全息图优点的前提下, 研究彩虹消色全息的新技术是十分必要的。

彩虹消色的基本思想是使再现像的出瞳处形成多狭缝, 当用白光照明再现时, 由于衍射使每个狭缝形成一个彩带, 多个彩带不同颜色光的非相干叠加, 使得出瞳面上每一点的光谱成分几乎包含了色度坐标上消色区所含有的波长颜色, 于是便观察到消色像。

本文所提出的合成多狭缝的彩虹消色像全息术, 是在近期文献发表的各种无狭缝彩虹全息^[5,6]的启示下形成的。可适用于任何一种无狭缝彩虹全息的记录系统, 后者需要多次曝光

或连续曝光, 本文只需作两次曝光, 使得在再现像出瞳面上形成一系列两束光的干涉条纹, 其亮纹就是合成的多狭缝。

二、原 理

本文以两步记录法为例, 第一步是记录物体 O 的非涅耳全息图 H_1 , 如图 1 所示。物体与全息图的距离为 Z_0 , 用平行光 R_1 作参考光, 在全息图上的入射角为 θ_1 , 物体光的平均入射角为零。第二步以与参考光 R_1 方向相反的共轭光 R_1^* 照明 H_1 , 得到共轭实像, 如图 2 所示。在记录时微小改变照明光 $O=R^*$ 的角度作二次曝光, 在改变照明光方向的同时, 再现像的位置也有相应的转动。记录 H_2 时用平行参考光 R_2 , R_2 在 H_2 的入射角为 θ_2 , 用 Z_{12} 表示 H_1 与 H_2 之间的距离。

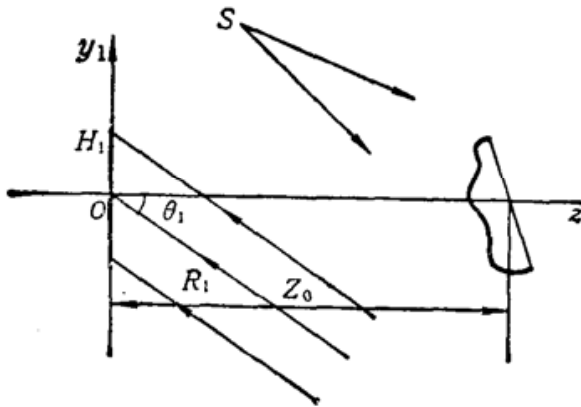


Fig. 1 Geometry for recording Fresnel holograms

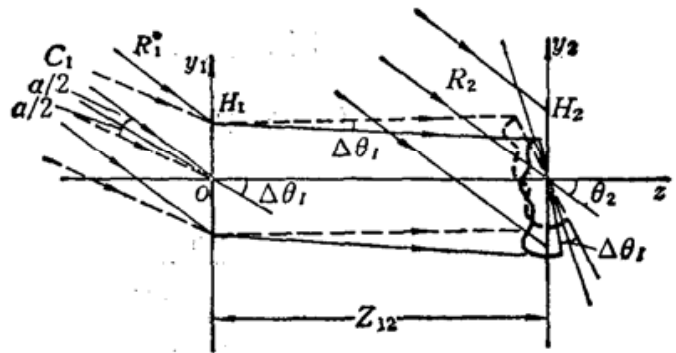


Fig. 2 A recording geometry for the achromatic image holograms

设用 $O(x_1, y_1)$ 表示在 H_1 上的物光分布; $R_1(x_1, y_1)$ 为参考光的光分布, 且

$$R_1(x_1, y_1) = \exp[jky_1 \sin \theta_1] \tag{1}$$

式中设参考光的振幅大小为 1。

在线性记录条件下, 全息图的振幅透射系数为

$$T_1(x_1, y_1) = \beta_0 + \beta_1 t_1 [1 + |O(x_1, y_1)|^2 + R_1 O^*(x_1, y_1) + R_1^* O(x_1, y_1)] \tag{2}$$

式中 β_0, β_1 是与记录介质有关的常数, t_1 是曝光时间。照明光 $O_1(x_1, y_1)$ 是与 R_1 方向相反的平行光, 但入射角有一微小角度 α 的改变:

$$\begin{aligned} O(x_1, y_1) &= R_1^*(x_1, y_1, \alpha) = \exp[-jky_1 \sin(\theta_1 - \alpha)] \\ &\approx \exp[-jky_1 (\sin \theta_1 - \alpha \cos \theta)] \end{aligned} \tag{3}$$

用 $O_1(x_1, y_1)$ 表示式(2)中的共轭再现像光波, 所以在 H_1 平面右方有

$$\begin{aligned} O_1(x_1, y_1, \alpha) &= \beta_1 t_1 R_1(x_1, y_1) O^*(x_1, y_1) O_1(x_1, y_1) \\ &= \beta_1 t_1 O^*(x_1, y_1) \exp[jk\alpha y_1 \cos \theta_1] \end{aligned} \tag{4}$$

在上式的运算中利用了式(3), 当此物光波传播到全息图 H_2 时, 用 $O_2(x_2, y_2, \alpha)$ 表示, 并可写成

$$O_2(x_2, y_2, \alpha) = \beta_1 t_1 \frac{\exp(jkZ_{12})}{j\lambda_0 Z_{12}} \iint O^*(x_1, y_1) \exp[jk\alpha y_1 \cos \theta_1]$$

$$\cdot \exp\left\{j \frac{k}{2Z_{12}} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (5)$$

参考光 R_2 写成

$$R_2(x_2, y_2) = \exp[-jk y_2 \sin \theta_2] \quad (6)$$

在全息干板 H_2 上的曝光强度为

$$I = 1 + |O_2(x_2, y_2, \alpha)|^2 + R_2(x_2, y_2) O_2^*(x_2, y_2, \alpha) + R_2^*(x_2, y_2) O_2(x_2, y_2, \alpha) \quad (7)$$

对全息干板 H_2 需要曝光二次, 此时照明光 $O_1(x_1, y_1)$ 需要自 $R_1^*(x_1, y_1)$ 的原有入射角 θ_1 改变 $\pm \alpha/20$, 所以总曝光量为

$$H = \beta_1 t_0 \sum_{m=-1/2}^{1/2} [1 + |O_2(x_2, y_2, \alpha)|^2 + R_2(x_2, y_2) O_2^*(x_2, y_2, m\alpha) + R_2^*(x_2, y_2) O_2(x_2, y_2, m\alpha)] \quad (8)$$

在线性记录条件下, 曝光时间每次为 t_0 , 全息图 H_2 通过显影处理以后振幅透射系数为

$$T_2(x_2, y_2) = \beta_0 + \beta_2 t_0 H \quad (9)$$

设用 $O_2 = R_2^*(x_2, y_2)$ 照明 H_2 再现, 并取其中的共轭像项, 即对应式(8)中 H 的第三项, 有

$$O_3(x_2, y_2) = \beta_2 t_0 \sum_{m=-1/2}^{1/2} O_2^*(x_2, y_2, m\alpha) \quad (10)$$

将式(5)代入上式后有

$$O_3(x_2, y_2) = C \frac{\exp[-jkZ_{12}]}{-j\lambda_0 Z_{12}} \iint O(x_1, y_1) \cos\left(\frac{1}{2} k\alpha y_1 \cos \theta_1\right) \cdot \exp\left\{-j \frac{k}{2Z_{12}} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \quad (11)$$

式中 $C = 2\beta_1\beta_2 t_1 t_0$, 式中的余弦项说明物光波具有余弦分布。在图2和3中我们将这一现象

用两个再现像表示出来, 因为两再现物光波是相干的, 因而具有余弦分布。

为了考察在出瞳面上的光分布, 需要导出 $O_3(x_2, y_2)$ 传播到 H_1 平面的情况, 即对 $O_3(x_2, y_2)$ 沿 Z 轴再求一次菲涅耳积分。此处可以采用文献[5]的处理方法, 因为文献[5]是多次曝光, 此处为两次曝光, 主要区别是调制因子不同, 所以有

$$O_3(x_1, y_1) = C \cos\left(\frac{\pi}{\lambda_0} \alpha y_1 \cos \theta_1\right) O(x_1, y_1) \quad (12)$$

这说明在出瞳面上的光场分布是原物光波和余弦调制因子的乘积, 即光场为两束光的干涉, 在出瞳面上形成亮暗宽度相等的干涉条纹。条纹间距

$$d = \lambda_0 / \alpha \cos \theta_1 \quad (13)$$

亮纹宽度 a 亦即合成狭缝宽度 W 为

$$a = W = d/2 = \lambda_0 / 2 \alpha \cos \theta_1 \quad (14)$$

从物理概念上理解这一结果实质上是 $O(x_1, y_1)$ 波面的两次曝光全息干涉, 两波面之间有一微小的夹角, 条纹对比度为 1。

我们可以把亮条纹看作合成狭缝, 狭缝的多少与转角大小、 H_1 被照明的面积以及 θ_1 和 λ_0

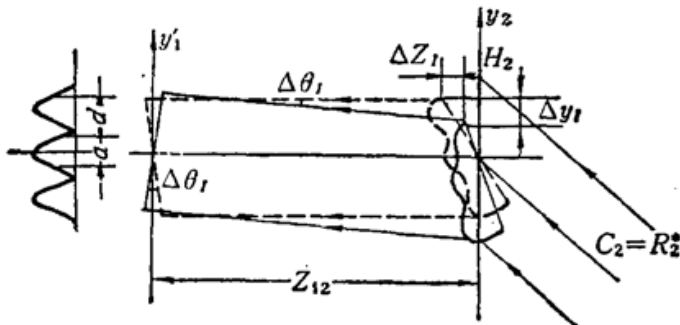


Fig. 3 A reconstructing optical system of the hologram H_2

有关, λ_0 是记录光的波长。图 3 是 H_2 的再现光路, 在图 3 的左端画出了条纹的强度分布曲线。0 级条纹对应 $O(x_1, y_1)$ 在两次曝光时波面交点的位置, 由图 2 可知取决于照明光 O_1 转轴的位置, 所以可根据需要安置在适当的位置。图 3 是转轴在物光波面中心的情形, 有 0 级和 ± 1 级三个亮纹。也可以将 0 级偏置在 H_1 的一端或离开 H_1 。

三、分 析

现在我们来分析用白光照明 H_2 时如何看到消色像。如图 4 所示, 当用白光照明时, 光瞳 (H_1) 处的亮暗条纹将因波长不同产生纵向和横向位移, 按照已知的公式位移量的大小为

$$\Delta y_\lambda = \Delta\lambda Z_{12} \sin \theta_2 / \lambda_0 \quad (15)$$

和
$$\Delta Z_\lambda = \Delta\lambda Z_{12} / \lambda_0 \quad (16)$$

图 4 中我们分别用实线表示亮纹极大值, 虚线表示暗纹 O 值的位置。R、G、B 分别表示红、绿、蓝三种波长。因为采用 He-Ne 激光波长记录, 所以红光条纹位于原 H_1 的位置; 蓝光条纹远离 H_2 。如果将眼睛置于 E 处来观察再现像 (E 同时代表眼睛的直径) I 上的一点 $I_1(x_1, y_1, z_1)$; 自 I_1 射出的光线进入人眼的部分将受眼睛的限制。所包含的光谱成分应是两边边缘光线中间所有波长, 由图 4 可见包含了可见光谱所有的成分, 虽然各光谱成份的能量不同, 只要合成色落在色品图的消色区域就是消色像。由图 4 可以理解消色的条件应有 $\Delta y_\lambda = d$, 其中 Δy_λ 是条纹的横向色散。由式(13)和(15)可求出满足消色条件的 α 值为

$$\alpha \geq \lambda_0^2 / \Delta\lambda Z_{12} \sin \theta_2 \cos \theta_1 \quad (17)$$

设 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 230 \text{ nm}$, $Z_{12} = 500 \text{ mm}$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$, 求得 $\alpha = 1.05''$, 可见转角是很小的。

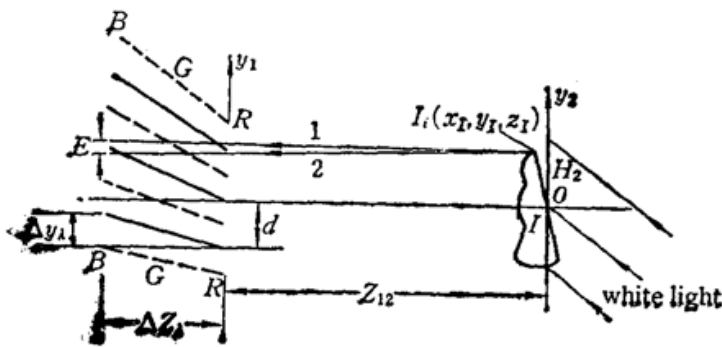


Fig. 4 Construction of the achromatic image

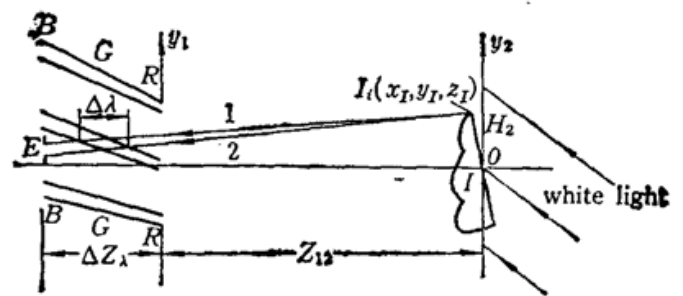


Fig. 5 Resolution limit of the achromatic image

为了与合成狭缝彩虹全息相比较, 我们绘制了示意图 5, 由于合成狭缝是多光束干涉, 亮纹很窄。图 5 中不同波长狭缝的像用两条实线表示。当人眼 E 置于任意位置时, 可看到单色像, 单色像的波长范围用 $\Delta\lambda$ 表示。由此可以看到获得单色像和消色像的区别。

由图 2 或 3 可以看到由于二次曝光时像的位移所产生的像点模糊 Δy_I 和 ΔZ_I 有^[7]

$$\Delta y_I = Z_{12} \Delta\theta_I = Z_{12} \alpha \cos \theta_1 \quad (18)$$

$$\Delta Z_I = y_2 \Delta\theta_I = y_2 \alpha \cos \theta_1 \quad (19)$$

因为 $Z_{12} \gg y_2$, 所 $\Delta y_I \ll \Delta Z_I$ 。又因为 α 角很小, 故 Δy_I 和 ΔZ_I 的影响总是可以忽略的。

四、实 验

实验条件: 第一张全息图用 120×80 mm 的干板, 参、物夹角为 70° 。第二次记录时 H_1 的照明面积近似为长轴 100 mm, 短轴 70 mm 的椭圆。 H_1 和 H_2 的距离 $Z_{12} = 240$ mm, 参、物夹角 $\theta_2 = 16^\circ$, 记录波长 $\lambda_0 = 633$ nm, 照明光 C_1 的转角为 $1.6''$, 当用激光照明 ($C_2 = R_2^*$) 再现时, 在出瞳面上(原记录时 H_1 面)有两条亮纹, 如图 6 的照片所示。当用白光照明再现时, 再现像消色效果很好, 像也很清晰, 图 7(a) 为再现像的照片。

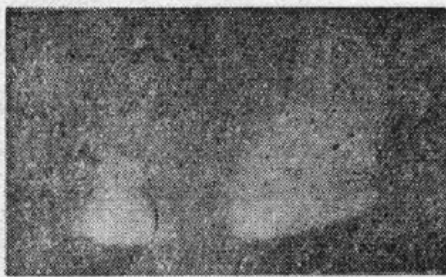


Fig. 6 Photograph of interferogram at the exit pupil plane

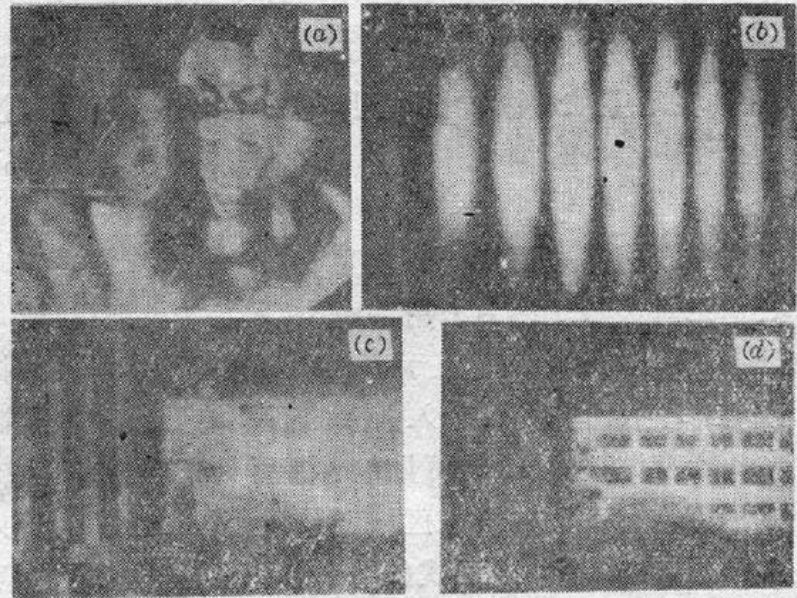


Fig. 7 Photograph of the achromatic image

图 7(b)~(d) 是另一张消色像全息图的一组照片。原物是一建筑物的模型。第一张全息图 H_1 是用 240×180 mm² 的干板拍照的。由于模型两建筑物的距离较大, 在拍摄再现像的照片时分别对前后两个建筑物调焦, 如图 7(c)、(d) 所示。关于像的景深原则上与彩虹全息图的景深相同, 因为它们在出瞳处观察时色散都受狭缝的限制。或者说都是受 H_2 中线全息图的限制, 可以用文献 [7] 式 (10-9) 计算色模糊。即

$$\Delta Y_\lambda = a Z_0 / Z_{12} \quad (20)$$

当 ΔY_λ 等于人眼的最小分辨距离时所对应的 Z_0 , 可以认为是景深。设人眼的最小分辨距离为 γZ_{12} , γ 是人眼的角分辨率, 则有

$$Z_0 = \gamma Z_{12}^2 / a \quad (21)$$

如果物体跨立在全息图的两边, 则景深为 $2 Z_0$ 。

参 考 文 献

- 1 D. J. De Bitetto, *Appl. Phys. Lett.*, **9** (12), 417 (1966)
- 2 E. N. Leitt, H. Chen *et al.*, *Appl. Opt.*, **17** (2), 3187 (1978)
- 3 范 诚, 于美文, *光学学报*, **9** (6), 527~532 (1989)
- 4 T. Okoshi, K. Hctote, *Appl. Opt.*, **14** (12), 3078~3081 (1975)
- 5 国承山, 周衍勋 *et al.*, *光学学报*, **7** (9), 794~798 (1987)
- 6 国承山, *中国激光*, **14** (12), 738~740 (1987)
- 7 于美文 *et al.*, *光学全息与信息处理* (国防工业出版社, 1986), p. 23, 162