

无透镜一步彩虹全息

关承祥 满德发* 李德敏 张伟力 野晓光

哈尔滨师范大学物理系, 哈尔滨 150080

* 哈尔滨科技大学技术物理系, 哈尔滨 150080

摘 要 采用合成狭缝的方法, 不用透镜成像, 直接对三维漫射物体一次拍出彩虹全息图。这个全息图重现像的观察范围很宽, 视场不受透镜孔径的限制。对该方法作了理论分析, 并给出实验结果。

关键词 彩虹全息术, 合成狭缝。

1 引 言

彩虹全息图因其适合模压复制, 而显示了它的实用价值。在一步彩虹全息术中^[1], 通常要用透镜成像, 使全息图的视场受到透镜孔径的限制。曾有一些用增大成像透镜孔径和相对孔径的方法来扩大视场的报道^[2-5], 使一步彩虹全息图的视场展宽了很多, 但透镜孔径的限制还不能完全消除。本文采用合成狭缝的方法^[6], 通过适当选取参考光和重现照明光的距离来控制合成狭缝的位置, 不用成像透镜, 直接对三维漫射物体拍摄彩虹全息图。

2 理论分析

如图 1 所示, 被摄三维漫射物体 $O(x_0, y_0, z_0)$ 直接置于全息记录介质前, 用平行于 xz 平面的平行光照明物体。记录时物体的移动方向垂直于 xz 平面, 位移量为 ε , 位移后物体表面的光场分布为^[5]:

$$O'(x_0, y_0, z_0; \varepsilon) = O(x_0, y_0 - \varepsilon, z_0). \quad (1)$$

物体直接置于距记录底片比较近的位置, 为了减少复杂的计算, 物光到记录底片的衍射过程采用了菲涅耳近似条件, 忽略了 $1/z_0^3$ 项和以上的高次项, 则物元 z_0 在全息底片上的光场分布为:

$$O_A(x, y; z_0; \varepsilon) = \frac{\exp(jkz_0)}{j\lambda z_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} O'(x_0, y_0, z_0; \varepsilon) \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

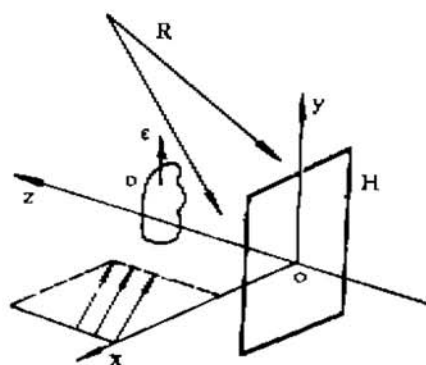


Fig. 1 A basic recording configuration

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为记录时物光波长。参考光波在全息底片上的分布为

$$R(x, y) = \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda z_c} [x^2 + (y - y_c)^2] \right\} \quad (3)$$

在记录过程中物体移动了 ϵ_0 , 通过线性曝光和显影后底片透射率为 t , 其中关心的部分是

$$t(x, y; z_0) = \int_{-\epsilon_0/2}^{+\epsilon_0/2} O_h(x, y; z_0; \epsilon) R^*(x, y) d\epsilon. \quad (4)$$

重现时照明光波为

$$c(x, y) = \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda' z_c} [x^2 + (y - y_c)^2] \right\}, \quad (5)$$

式中 λ' 为重现照明光波长, 透过全息图的重现光波为

$$u(x, y; z_0) = a \exp \left[j\pi \left(\frac{1}{\lambda' z_c} - \frac{1}{\lambda z_c} \right) (x^2 + y^2) \right] \int_{-\epsilon_0/2}^{+\epsilon_0/2} O_h(x, y; z_0; \epsilon) d\epsilon, \quad (6)$$

式中 $a = \exp [j\pi(y_c^2/\lambda' z_c - y_c^2/\lambda z_c)]$ 为常数相位因子, 并且其中记录时参考光和重现照明光与光轴的夹角满足 $y_c/\lambda' z_c = y_c/\lambda z_c$.

考虑(2)、(6)式后在全息图后人眼观察处 z_r 平面上的光场分布为

$$U(x_r, y_r; z_0) = \frac{A}{j\lambda' z_r} \exp(jkz_0) \exp \left[\left\{ \frac{-j\pi}{\lambda' z_r} \right\} \left(1 + \frac{\lambda z_0}{\lambda' z_c} \right) (x_r^2 + y_r^2) \right] \\ \times \text{sinc} \left\{ \frac{\epsilon_0 y_r}{\lambda' z_r} \right\} \mathcal{F} \{ O(x_0, y_0, z_0) \}_{z = \frac{z_r}{\lambda'}, y = \frac{y_r}{\lambda'}}, \quad (7)$$

式中 $A = a \epsilon_0 \exp(jk'z_0)$, $(z_r)^{-1} = (z_c)^{-1} - (\lambda'/\lambda z_c)$. 全部重现光在全息图后 z_r 平面上光场分布为

$$U(x_r, y_r) = A \text{sinc} \left\{ \frac{\epsilon_0 y_r}{\lambda' z_r} \right\} U_0(x_r, y_r), \quad (8)$$

$$U_0(x_r, y_r) = \frac{1}{j\lambda' z_r} \int \exp(jkz_0) \exp \left[\left\{ \frac{-j\pi}{\lambda' z_r} \right\} \left(1 + \frac{\lambda z_0}{\lambda' z_c} \right) (x_0^2 + y_0^2) \right] \\ \times \mathcal{F} \{ O(x_0, y_0, z_0) \} dz_0. \quad (9)$$

由上式可知 z_r 平面上的光场是物光波的频谱与 sinc 函数的乘积。sinc 函数的中央主极大即为合成狭缝, 其宽度为

$$W = \frac{2\lambda' z_r}{\epsilon_0}. \quad (10)$$

合成狭缝的位置 z_r 由 z_c 、 z_r 及 λ'/λ 来确定。

3 实验结果和讨论

在布置光路时物体与记录底片的距离要合适, 如果距离过远, 色模糊增加, 如果太靠近则影响参考光的照射, 实验中参照文献[1], 物体与记录底片之间的距离取 2.5 cm。由于物体离底片较近, 物体的高度受到限制, 物体的高度越高参考光与光轴的夹角就要越大, 否则物体挡参考光, 因此这种方法不适合拍太高的物体。实验中所用的物体高 3 cm, 宽 5 cm, 参考光与光轴的夹角约 55° 。用 He-Ne 激光记录, 用白光重现, 取 $\lambda'/\lambda = 0.8$ 。在实验中取 $z_c = 24$ cm, $z_r = 120$ cm, 合成狭缝的位置也就是人眼距全息图的观察距离 $z_r = -40$ cm。在曝光过程中物体沿 y 轴方向匀速移动距离 $\epsilon_0 = 0.2$ mm, 合成狭缝宽度约 2 mm。用不同的合成狭缝

宽度进行实验。当宽度增加到 3 mm 时，看到全息图像有轻度的色模糊；宽度再增加，色模糊加重，对图像的清晰度有较大的影响；其宽度在 2 mm 时，感觉不到色模糊，图像清晰。当合成狭缝的宽度不同值时，对狭缝的长度没有影响。图 2 为实验中记录的彩虹全息图的部分合成狭缝。其拍摄方法是用 Ar^+ 激光器单谱线输出 514.5 nm 激光，经扩束照射全息图，在全息图后 z_c 平面直接用相纸曝光显影所得。由于合成狭缝很长而受画面大小的限制，这里只能取一段。用白光照明全息图时在对物体的张角为 100° 的范围内观察到无色模糊的全息像，超过这个范围还可以看到全息像但有严重的色模糊。如果用单色光照明可以在超过 140° 角的范围内看到全息像。图 3 是这个彩虹全息图的白光重现像的照片。



Fig. 2 A part of the synthesized slit



Fig. 3 White-light reconstructed holographic image

这种不同透镜成像、对物体直接一次拍摄的彩虹全息图立体感强，没有透镜孔镜的限制，光路简单，因不受真实狭缝的限制光能利用率高。这种方法在拍摄用实物做图案的模压全息图的母板是有实际意义的。

参 考 文 献

- [1] H. Chen, F. T. S. Yu, One-step rainbow hologram. *Opt. Lett.*, 1978, 2(4): 85~87
- [2] P. N. Tamura, One-step rainbow holography with a field lens. *Appl. Opt.*, 1978, 17(21): 3343
- [3] 王能鹤, 沃敏政, 路敦武等, 用大口径和大相对孔径的非球面反射镜拍摄一步彩虹全息图. *光学学报*, 1982, 2(1): 48~52
- [4] 单启聿, 陈桂兰, 牟幸福等, 长狭缝一步彩虹全息. *中国激光*, 1985, 12(7): 432~435
- [5] 关承祥, 无狭缝一步彩虹全息的新方法. *光学学报*, 1990, 10(8): 742~746
- [6] C. P. Grover, H. M. Van Driel, Rainbow holography using full object beam aperture. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, 70(3): 335~338

Lensless One-Step Rainbow Holography

Guan Chengxiang Man Defa* Li Demin Zhang Weili Ye Xiaoguang

Department of Physics, Harbin Normal University, Harbin 150080

* *Department of Technical Physics, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080*

(Received 25 December 1994; revised 6 March 1995)

Abstract A method of lensless one-step rainbow holography for diffuse 3-D objects with a synthetic slit is proposed. The visual field of the reconstructed image is extended and is not limited by the aperture of the lens. A theoretical analysis and some experimental results are presented.

Key words rainbow holography, synthetic slit.