

# 大景深彩虹全息图的获得与观察条件

江朝川

(南方激光印刷有限公司, 东莞 511700)

## 提 要

本文从彩虹全息的线状点基元全息图入手,首次对其景深进行了分析和讨论.理论上证明了只要满足一定的观察条件,则彩虹全息可以进行大景深的记录和再现;实验上获得了景深达450 mm的彩虹全息图.

**关键词** 彩虹全息术, 景深, 视场切割.

## 1 引 言

通常,人们认为彩虹全息图当其所记录的物体景深较大时,由于白光再现会引起很大的色模糊<sup>[1~4]</sup>,因而不能看到清晰的再现像.在常规观察方式下,即人眼位于再现狭缝实像处观察时,情况的确如此,所以至今尚未见大景深彩虹全息图的报道.但是,通过对彩虹全息的线状点基元全息图(简称线全息图)的深入分析和研究,发现彩虹全息所能记录的物体的景深,与观察距离密切相关,观察距离增大,则景深相应增加,只要满足一定的观察条件,便可以避免视场切割,获得满足人眼分辨率要求的大景深彩虹全息图.

需要说明的是,这里所说的大景深是指被记录景物本身的纵向尺寸,而与像散彩虹全息图不同.后者只是把全息干板附近的像移到离干板一定距离处而实现深度像即大景深(比如0.5 m)的全息再现,但所记录物体本身的景深却相当有限,仍与普通彩虹全息图相当<sup>[5]</sup>.

## 2 景深与观察条件的关系

以往的彩虹全息理论,难以分析景深问题.本节从线全息图入手,在文献[5]的基础上对景深进行分析和讨论,以得出景深与观察条件的关系.

在文献[5]中已得出:

$$\text{若 } w_H > \frac{Z_I D_E}{Z_E + Z_I}, \text{ 则 } \Delta x_i = w_H + \frac{Z_I}{Z_E} w_H \quad (1)$$

$$\text{若 } w_H < \frac{Z_I D_E}{Z_E + Z_I}, \text{ 则 } \Delta x_i = \frac{Z_I}{Z_E} D_E \quad (2)$$

式中  $w_H$  为线全息图的宽度,  $Z_i$  为像点距离,  $Z_E$  为观察距离,  $D_E$  为人眼瞳孔直径,  $\Delta x_i$  为人眼能看到的像点扩展.若要看到清晰的再现像,则必须要求  $\Delta x_i$  对人眼的夹角小于人眼的视角分辨极限  $\alpha_E (= 3 \times 10^{-4} \text{ rad})$ . 如令

$$\Delta x_i = \alpha_E (Z_E + Z_I) \quad (3)$$

则由(1)、(2)式可得,线全息图宽度需满足

$$w_H \leq \alpha_B Z_B \quad (4)$$

这个结论是容易理解的,因为人眼需通过线全息图才能看到对应的像点.要求所看到的像点扩展满足(3)式,即是要求对应的线全息图宽度满足(4)式.另一方面,考虑到狭缝衍射的影响,线全息图宽度应表为<sup>[5]</sup>

$$w_H = \frac{Z_0 W}{Z_0 + Z_s} + \frac{\lambda_0 Z_s}{W} \quad (5)$$

式中第一项表示几何投影.第二项表示狭缝的衍射. $W$ 为狭缝宽度, $\lambda_0$ 为记录波长, $Z_0$ 、 $Z_s$ 分别为物距和狭缝距离.由(5)式对 $W$ 求导可得当 $W$ 取值为

$$W_{opt} = \left[ \frac{\lambda_0 Z_s (Z_s + Z_0)}{Z_0} \right]^{1/2} \quad (6)$$

时, $w_H$ 取最小值为

$$w_{Hm} = 2 \left[ \frac{\lambda_0 Z_0 Z_s}{Z_s + Z_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

将(7)式代入(4)式可得 $Z_0$ 的取值范围为

$$Z_0 \leq \frac{\alpha_B^2 Z_s Z_B^2}{4\lambda_0 Z_s - \alpha_B^2 Z_B^2} \quad (8)$$

当物与狭缝在干板的同侧时,同理可得出类似的结论.因此,彩虹全息图所能记录物体的最大纵深范围为

$$-\frac{\alpha_B^2 Z_s Z_B^2}{4\lambda_0 Z_s - \alpha_B^2 Z_B^2} \leq Z_0 \leq \frac{\alpha_B^2 Z_s Z_B^2}{4\lambda_0 Z_s + \alpha_B^2 Z_B^2} \quad (9)$$

所以,景深为

$$\Delta Z_0 = \frac{8\lambda_0 \alpha_B^2 Z_s^2 Z_B^2}{16\lambda_0^2 Z_s^2 - \alpha_B^4 Z_B^4} \quad (10)$$

当 $Z_B = Z_s$ ,即眼睛位于狭缝处观察时,景深可表为

$$\Delta Z_0 = \frac{8\lambda_0 \alpha_B^2 Z_s^2}{16\lambda_0^2 - \alpha_B^4 Z_s^2} \quad (11)$$

(11)式说明增大 $Z_s$ 有利于增大景深,但 $Z_s$ 太大会引起实验上的困难.一般情况下, $Z_B = Z_s = 500$  mm,  $\lambda_0 = 632.8$  nm,则由(11)式可算得 $\Delta Z_0 = 18$  mm.可见,彩虹全息的景深在通常情况下的确是很小的.但是,从(10)式可看出,即使不增大 $Z_s$ ,但只要 $Z_B > Z_s$ ,则 $\Delta Z_0$ 随 $Z_B$ 的增大而迅速增大.例如,仍取 $Z_s = 500$  mm,若 $Z_B = 2000$  mm,则 $\Delta Z_0 = 310$  mm;若 $Z_B = 3000$  mm,则 $\Delta Z_0 = 653$  mm.因此,只要满足远离狭缝像观察的条件,即可记录和再现大景深的彩虹全息图.需要指明的是,(10)式是在取(6)式决定的缝宽条件下得出的最大景深.实际应用中当 $Z_0$ 较大时,(6)式决定的 $W_{opt}$ 取值太小,会造成实验上的困难.这时,可将(5)式代入(4)式把景深表示为 $W$ 的函数为

$$-\frac{\alpha_B Z_B Z_s W - \lambda_0 Z_s^2}{W^2 - \alpha_B Z_B + \lambda_0 Z_s} \leq Z_0 \leq \frac{\alpha_B Z_B Z_s W - \lambda_0 Z_s^2}{W^2 + \alpha_B Z_B W - \lambda_0 Z_s} \quad (12)$$

$$\Delta Z_0 = \frac{2W^2 (\alpha_B Z_B Z_s W - \lambda_0 Z_s^2)}{W^4 - (\alpha_B Z_B W - \lambda_0 Z_s)^2} \quad (13)$$

例如,取 $W = 2$  mm,  $Z_s = 500$  mm时,景深仍可达 $\Delta Z_0 = 430$  mm.

### 3 视场切割的避免和再现像的颜色

#### 3.1 视场切割的避免

当人眼远离狭缝像进行观察时,有可能会发生视场切割,导致不能在同一位置看到全景像.但是,由于白光再现引起的色弥散,使狭缝像的宽度大为增加,只要  $Z_s, Z_E$  和全息图尺寸  $D_H$  之间满足一定的关系,且景物大小不超过  $EA, EB$  两线之间的区域,便可避免视场切割的发生(见图 1).由图 1 所示几何关系可得

$$D_H = \frac{Z_E}{Z_E - Z_s} \Delta x_n \quad (14)$$

式中  $\Delta x_n$  为狭缝的扩展量.为简便记,设参考光和再现光场为平行光.且角度相同,则由全息物像公式可得狭缝像的位置为

$$x_n = x_s + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) Z_s \text{tg} \theta_R \quad (15)$$

式中  $\lambda_0$  和  $\lambda$  分别为记录与再现波长,  $x_s$  为记录时的狭缝位置.由(15)式可得两波长  $\lambda_1, \lambda_2$  所对应的狭缝像之间的间隔为

$$\Delta x_n = - \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \lambda_0 Z_s \text{tg} \theta_R \quad (16)$$

将此式代入(14)式有

$$D_H = - \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_0 Z_s Z_E}{\lambda_1 \lambda_2 (Z_E - Z_s)} \text{tg} \theta_R \quad (17)$$

若设  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}, \lambda_1 = 400 \text{ nm}, \lambda_2 = 700 \text{ nm}, Z_s = 500 \text{ mm}, Z_E = 3000 \text{ mm}, \theta_R = -45^\circ$ ,则有  $\Delta x_n = 339 \text{ mm}, D_H = 407 \text{ mm}$ .也就是说,在上述记录和观察条件下,只要全息图尺寸小于  $407 \text{ mm}$ ,便不会产生视场切割.

#### 3.2 再现像的颜色

白光再现时,彩虹全息图再现像上某一像点的单色性可近似表为<sup>[1]</sup>

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{W + D_E}{Z_E \sin \theta_R} \quad (18)$$

式中  $\theta_R$  为参考光的入射角.由此式可知,观察距离  $Z_E$  的增大,不仅不会影响像点的单色性,反而还会使  $\Delta \lambda$  降低,因而人眼感觉到的像点色模糊减小,这从另一个方面说明了增大  $Z_E$  可提高景深.不过,人眼离开狭缝像进行观察时,由于对再现像的不同部分是通过不同颜色的狭缝像观察到的,因此,尽管就每一像点来说单色性很好,但整个再现像却不是单色的,不同的地方会呈现不同的颜色,如图 2 所示.在图中 1 观察位置,即狭缝再现像处,人眼将看到绿色的单色像;在 2 位置观察,则再现像的顶部为橙黄色,中部为绿色、底部为兰绿色;在 3 位置观察,则再现像的顶部变为红色、中部仍为绿色,下部变为兰色.

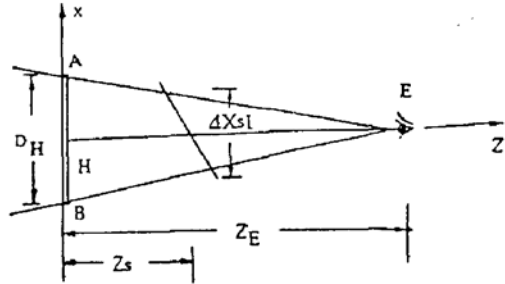


Fig. 1 elimination conditions of cutting of viewing field

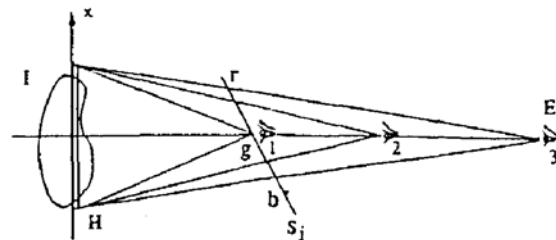


Fig. 2 variation of color of reconstruction image with the viewing positions

## 4 实验及结果

实验中采用二步法制作大景深彩虹全息图. 第一步拍摄菲涅耳全息图时, 所用激光器为腔长 1.5 m 的 He-Ne 激光器. 拍摄物为分离放置的 4 个小雕像. 由于所拍景物的景深较大, 约为 450 mm, 为使从景物不同部分发出的物光波与参考光波的光程差都小于激光器的相干长度, 采用物光补偿的办法, 用两束物光分区照明景物, 光路布置使参考光与两束物光都等光程. 这样使景物的各部分都被相干光照明. 从而在干板上参考光和物光能很好地干涉, 记录光路如图 3 所示. 参考光用平行光, 入射角约  $45^\circ$ , 从分束镜  $BS_2$  透射的物光照明景物的 I 区, 从  $BS_2$  反射的物光照明景物的 II 区. 记录介质采用天津 I 型全息干板, 其尺寸为  $180 \times 90 \text{ mm}^2$ , 景物的近点距干板约 370 mm.

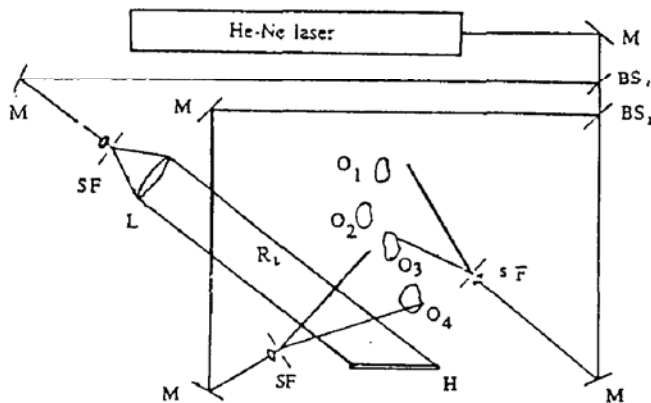


Fig. 3 recording for Fresnel hologram with large scene depth

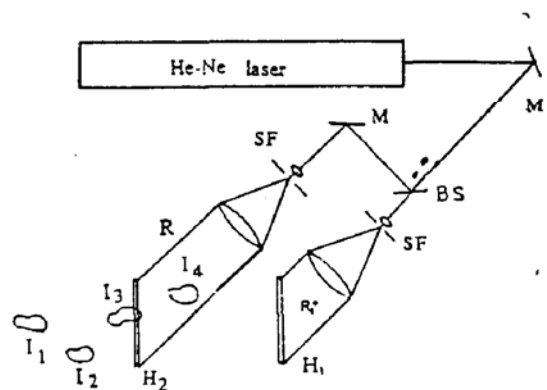


Fig. 4 recording for rainbow hologram

第二步记录光路如图 4 所示. 用共轭光照明再现  $H_1, H_1$  上置一狭缝  $S$ , 狭缝宽度为  $W = 2 \text{ mm}$ , 其偏离  $H_2$  中心的距离为 80 mm, 以使白光再现  $H_2$  时狭缝弥散像能相对于  $H_2$  轴线比较对称的分布.  $H_2$  置于  $H_1$  再现的实像中间, 其尺寸为  $120 \times 120$ , 与  $H_1$  之间的距离为  $Z_2 = 500 \text{ mm}$ . 当用白光照明再现  $H_2$  时, 在距  $H_2$  约 3000 mm 的地方, 能观察到清晰的再现像, 其深度感十分强烈. 由于  $H_2$  及景物横向尺寸都比较小, 再现像从顶部到底部的颜色变化不大, 比如当顶部呈黄绿色时, 底部呈绿色. 眼睛上下移动时, 颜色随之变化. 当观察者逐步靠近  $H_2$  进行观察时, 再现像渐渐变得模糊, 说明实验结果与理论分析相符. 由于观察距离远, 因而再现像不易用相机翻拍.

郭永康教授审阅了本文, 特此致谢.

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Wyant, Image blur for rainbow holograms. *Opt. Lett.*, 1977, 1(4):130~132
- [2] P. N. Tamura, Multi-color image from superposition of rainbow holograms. *Proc. SPIE*, 1977, 126:59~62
- [3] H. Chen, Color blur of the rainbow hologram. *Appl. Opt.*, 1978, 17(20):3290~3293
- [4] S. L. Zhuang, P. H. Ruterbusch, Y. W. Zhang et al., Resolution and color blur of the one-step rainbow hologram. *Appl. Opt.*, 1981, 20(5):872~878
- [5] 范诚, 江朝川, 郭履容, 从线全息图分析彩虹全息. *光学学报*, 1990, 10(9):845~850

## Large scene depth rainbow hologram and its viewing conditions

JIANG Chaochuan

(*South Hologram Co., LTD. Dongguan 511700*)

(Received 4 May 1992)

### Abstract

The Scene depth of rainbow hologram is analysed and discussed in detail based on the line-element hologram theory. It is theoretically demonstrated that the rainbow hologram can be used for displaying objects with large scene depth under certain viewing conditions. The rainbow holograms with scene depth of 450 mm are obtained in experiment.

**Key Words** rainbow holography, scene depth, cutting of viewing field.