

# 大视角一步彩虹全息术

范 诚 江朝川 郭履容

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

**提要:** 本文采用普通一步彩虹全息的记录光路, 多次曝光拍摄物体多个侧面的彩虹全息图, 从而可以克服一步彩虹全息视场受成像透镜相对孔径限制的缺点。

**关键词:** 彩虹全息术, 大视角, 渐晕效应

## One-step rainbow holography with large viewing angle

*Fan Cheng, Jiang Chaochuan, Guo Lürong*

(Information Optics Institute, Sichuan University, Chengdu)

**Abstract:** A rainbow hologram of several sides of an object is synthesized with the conventional one-step rainbow holography by multi-exposures, therefore, the viewing angle is no longer restricted by the relative aperture of the imaging lens. By choosing properly the recording parameters of separate exposure a satisfactory image with large viewing angle is obtained.

**Key words:** rainbow holography, large viewing angle, vignetting

### 一、引 言

彩虹全息的发明为全息三维显示走向实用开辟了广阔的前景。然而, 无论是 Benton 的二步法<sup>[1]</sup> 还是 H. Chen 和 F. T. S. Yu 的一步法<sup>[2]</sup>, 其致命的弱点都是再现像的视角受成像透镜或主全息图相对孔径的限制。制作大面积彩虹全息图需要大面积的主全息图或大相对孔径的高质量成像透镜; 前者难以实现大面积共轭光束, 后者却造价昂贵。因此, 单靠增大主全息图或成像透镜的大小来提高全息成像过程的信息传递能力是不现实的。已有一些文献就扩大视角对彩虹全息术进行了改进<sup>[3~5]</sup>, 然而这些方法都不能从根本上改变视角受限的问题, 因为在这些方法中, 全息图的信息量仍然受成像系统限制, 且会引入不必要的像差。本文提出多次曝光拍摄物体多个侧面, 把物体的大容量信息在同一全息图上分时记录的方法。这种方法可有效地增大系统的信息存贮和传递能力, 从根本上改变视角受记录过程中成像系统限制的缺陷, 获得大视角彩虹全息图, 其视角的大小取决于记录物体侧面的个数即曝光次数。

### 二、基本原理

为了问题简单起见, 并考虑到曝光次数的增加会导致衍射效率下降, 我们只讨论三次曝光

分别记录物体三个侧面的情况。

如图 1 所示, 采用加场镜的一步彩虹全息记录光路来制作全息图。加场镜的目的另一方面是为了使各个侧面的视场有所增大, 但这里更重要的是消除不加场镜时成像透镜  $L_1$  所带来的渐晕效应(vignetting), 使各个侧面的像有机地衔接在一起, 增强画面的整体感。关于这点将在下一节中详细讨论。

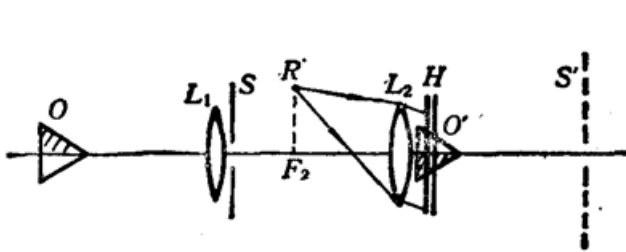


Fig. 1 Recording set-up of one-step rainbow holography

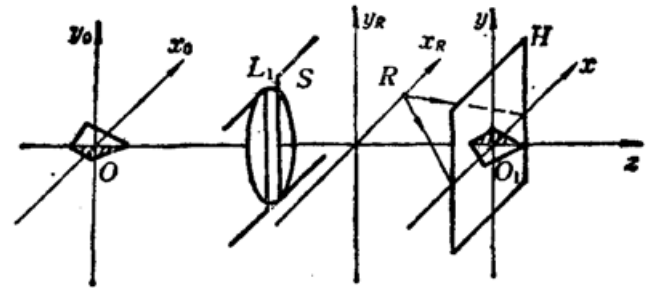


Fig. 2 Geometry of the first exposure

第一次曝光如图 2 所示, 按照普通彩虹全息记录方法使参考光轴、物光轴均在  $xz$  平面内, 且使干板与  $xy$  平面重合。图 2 中  $x_0y_0$  平面为物体的中心面;  $xy$  平面为  $x_0y_0$  平面的像面;  $x_Ry_R$  平面为场镜  $L_2$  的前焦面。为了使图简洁明了, 图中省去了场镜。

设物体的正面在  $xy$  平面的像场复振幅为  $O_1$ , 则第一次曝光所记录的干涉花样为

$$u_1 = |O_1|^2 + |R|^2 + O_1R^* + O_1^*R \tag{1}$$

其中  $R$  为参考光在  $xy$  平面的复振幅。

第二次曝光如图 3 所示, 将物体绕  $x_0$  轴旋转角度  $\theta$ , 这样相当于其像  $O'$  沿  $x$  轴旋转  $-\theta$ ; 绕  $x$  轴旋转干板  $-\theta$ , 并调整参考光轴使其同干板保持第一次曝光时的相对位置。这样记录相当于在记录物体第二个侧面时, 物光轴沿  $x$  轴旋转  $\theta$  而其它参数不变。以干板平面为  $xy$  平面建立新的坐标系, 并设物体旋转  $\theta$  角后其像场复振幅为  $O_2$ , 则第二次曝光后干板所记录的强度分布为

$$u_2 = |O_2|^2 + |R|^2 + R^*O_2e^{jky\sin\theta} + RO_2^*e^{-jky\sin\theta} \tag{2}$$

式中  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为记录波长。

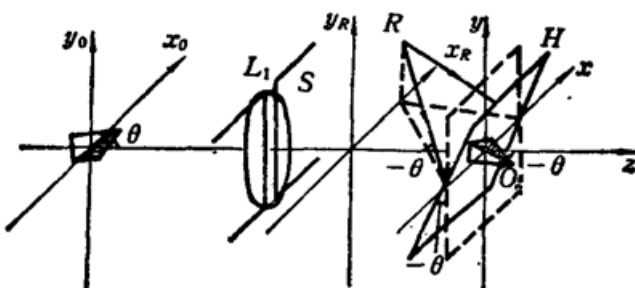


Fig. 3 Geometry of the second exposure

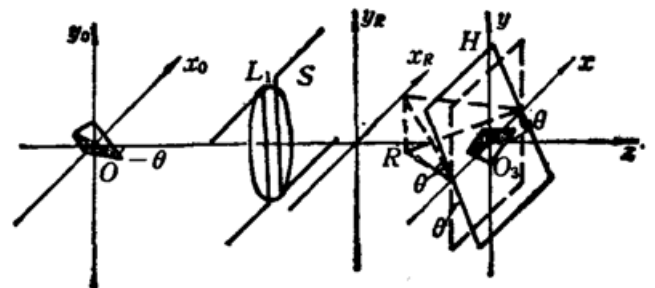


Fig. 4 Geometry of the third exposure

同理, 第三次曝光时使物体沿  $x_0$  轴旋转  $-\theta$  角, 干板及参考光轴绕  $x$  轴旋转  $\theta$  角, 如图 4 所示。设物体旋转  $-\theta$  后所对应的像场复振幅为  $O_3$ , 则第三次曝光所记录的强度分布为

$$u_3 = |O_3|^2 + |R|^2 + R^*O_3e^{-jky\sin\theta} + RO_3^*e^{jky\sin\theta} \tag{3}$$

三次曝光后, 全息图上总光强表达式为

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = (|O_1|^2 + |O_2|^2 + |O_3|^2 + 3|R|^2) + R^*(O_1 + O_2 e^{jkx \sin \theta} + O_3 e^{-jkx \sin \theta}) + R(O_1^* + O_2^* e^{-jkx \sin \theta} + O_3^* e^{jkx \sin \theta}) \quad (4)$$

式(1)~(4)均省略了与波前重现无关的常数因子。

当用原参考光再现时,只考察第二项,则再现光场可写为

$$O = RR^*(O_1 + O_2 e^{jkx \sin \theta} + O_3 e^{-jkx \sin \theta}) \quad (5)$$

即可在  $yz$  平面与  $x$  轴夹角为  $0, \theta, -\theta$  的方向分别看到物体  $O_1, O_2, O_3$  侧面的再现像(如图 5 所示)。

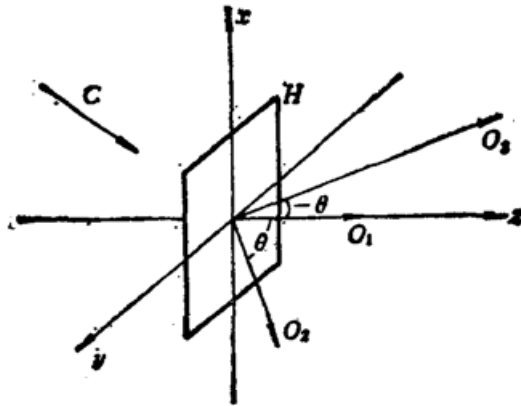


Fig. 5 Reconstruction of the hologram

### 三、实验中的基本问题及解决方法

#### 3.1 旋转角度 $\theta$ 的选择

$\theta$  的大小取决于各个侧面的像在  $y$  方向的信息量应使再现时每次曝光所记录的信息不致于重迭,从而在观察时各个侧面的再现像不会相互干扰。

设记录时狭缝像的长度为  $a$ ,狭缝像离干板的距离为  $S$ 。旋转干板相当于物光轴线  $x$  轴旋转,从而三次曝光狭缝像相对于干板的位置如图 6 所示。从图 6 中的几何关系可以看出,如要使每次曝光所记录的信息不致于重迭,则要求干板所旋转的最小角度为

$$\theta = 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{a}{2S} \quad (6)$$

若使旋转角大于(6)式所表达的  $\theta$ ,则各个侧面的信息不能衔接,从而我们选择(6)式所表达的角度为旋转角。

#### 3.2 各侧面再现像的衔接

从上面的讨论可以看出,对应于干板的旋转,必须旋转物体以相应的角度,才能确保在同一张全息图上各个侧面的体视感有机地联系起来。除了各个侧面的体视感相匹配外,在每个侧面的交界处,左右眼分别对应于不同侧面的再现像,由于双目体视效应,只要按照第二节所叙述的记录方式保证各侧面的像在干板上有其相应的位置,仍能观察到清晰的双目体视像。这种拍摄方式相当于拍摄组合全息图,只不过把组合全息图众多的二维全息像变为三个具有体视信息的彩虹全息像。

然而采用普通一步彩虹全息的方法却不能使各个侧面的信息有机地衔接,因为成像透镜

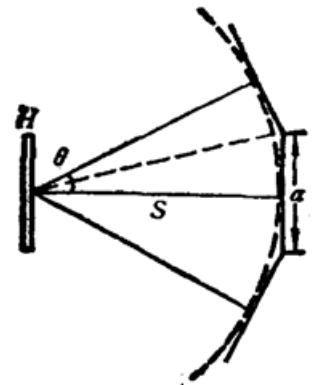


Fig. 6 Geometry for choosing  $\theta$

$L_1$  所产生的渐晕效应使在各个侧面的交界处人眼并不能观察到全景再现像(如图 7 所示)。可见,只有在阴影区以内才能观察到全景的再现像;在阴影区以外的光线边界内只能通过成像透镜观察到部分再现像,从而没有一个明显的边界使人从一个侧面的全景过渡到另一个侧面的全景。为此我们采用场镜使成像透镜在干板前成实像(如图 8 所示)。这样场镜把成像光束会聚于成像透镜的实像处,使人眼能满意地从一个侧面的全景过渡到另一侧面的全景,从而使整个画面融为一体。

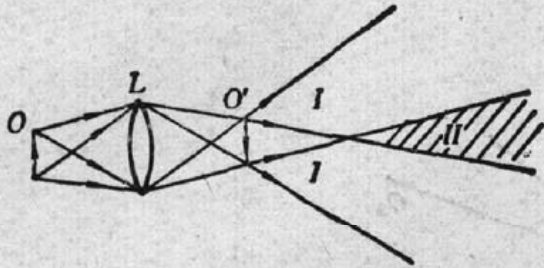


Fig. 7 Vignetting effects of conventional one-step rainbow holography

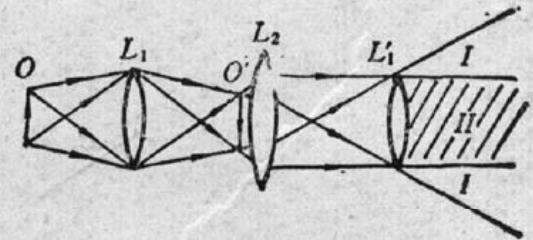


Fig. 8 Vignetting is eliminated by the field lens

#### 四、实验结果

我们按照以上描述的方法拍摄了大视角一步彩虹全息图。每次曝光时狭缝像的长度为 160 mm, 离干板的距离为 320 mm, 这样由式(6)可以算出:干板、物体及参考光轴的旋转角度为  $28^\circ$ , 从而所记录的全息图视角可达  $84^\circ$ 。记录干板采用天津 I 型全息干板, 全息图尺寸为  $90 \times 90 \text{ mm}^2$ ; 曝光时适当控制三次曝光的曝光量, 使三个侧面的像基本上等强度再现。若还想获得更大的视场, 则需增加曝光次数, 但这会导致衍射效率相应降低, 且光路改变过大会造成技术实施上的困难。图 9 是再现像三个侧面的照片, 实际观察全息图时, 除在三个方向分别能够看到三个侧面的全息像外, 在各个侧面的交界处仍能获得满意的体视感。



Fig. 9 The black and white photograph of reconstructed images  
(a) Left image; (b) Middle image; (c) Right image

#### 参 考 文 献

- 1 S. A. Benton, *JOSA*, **59**(10), 1545A (1969)
- 2 H. Chen, F. T. S. Yu, *Opt. Lett.*, **2**(4), 85 (1978)
- 3 P. N. Tamura, *Appl. Opt.*, **17**(21), 3342 (1978)
- 4 单启蜚 *et al.*, 中国激光, **12**(7), 432 (1985)
- 5 单启蜚 *et al.*, 光学学报, **9**(3), 232 (1989)