

# 像散彩虹全息中的 L-S-L 系统 深景三维像技术

刘淑辉 厉志明  
(浙江大学物理系)

## 提 要

我们在像散一步彩虹全息中采用 L-S-L 成像系统,对离干板约 50 cm 处,景深为 20 cm 的物组摄制彩虹全息图。当用白光光源进行原始像再现时,展现出一幅清晰的、无畸变的、有高度立体感的准单色深景三维正像。

## 一、引 言

1978年,Chen 和 Yu 提出了一步彩虹全息术<sup>[1]</sup>。同年,Leith 和 Chen 提出了深像彩虹全息术<sup>[2]</sup>。接着 Chen 将这两种技术结合起来,于 1979 年又提出了像散一步彩虹全息术<sup>[3]</sup>,获得了正的三维深像。其记录光路有二:(1)狭缝位于柱面透镜前焦平面和物之间的正像记录光路。这种光路由于垂直方向的渐晕现象影响了像的质量;(2)在像光路中引进场镜来获得正像。但由于大的场镜采用液体柱面透镜,因而同时引入了较大噪声。1981年,Chen 等在像散一步彩虹全息中运用孔径共轭技术<sup>[4]</sup>,在像光路中获得宽视场的准单色正三维深像。根据我们的理论计算表明,对于单透镜成像光路,在被摄物组的景深与物组再现像的垂直方向和水平方向放大率的匹配上存在严重矛盾,这一问题不解决将导致再现像的畸变。因而上述技术在被摄物的景深上受到很大的限制。我们在像散一步彩虹全息中采用了 L-S-L 成像系统<sup>[5]</sup>,摄制了离干板约 50 cm 处景深为 20 cm 的物组的像散彩虹全息图,获得了清晰的、垂直方向和水平方向放大率匹配的、横向放大率约等于 1 的、准单色深景三维正像。观看时物组层次分明,有很强的深度感和立体感。

## 二、理 论

像散一步彩虹全息 L-S-L 系统的记录光路和正分量波的再现像位置如图 1 所示。物点  $O$  由焦距为  $f_1$  和  $f_2$  的柱面透镜  $L_1$  和  $L_2$  以及狭缝  $SP$  组成的 L-S-L 系统成像。其水平方向像在物的位置,垂直方向像为  $I_V$ ,狭缝的像为  $SI$ 。这三个像作为“物”,波长为  $\lambda_1$  的“物”光束和像散参考光束在全息干板平面  $HP$  上产生干涉构成全息图。 $R$  为参考点光源, $R_V$  为  $R$  经由柱面透镜  $L_3$  所成的垂直方向的像。全息图在波长为  $\lambda_2$  的再现点光源  $O$  的照明下,水平方向和垂直方向的再现像分别为  $HI_H$  和  $HI_V$ ,狭缝再现像为  $HSI$ 。

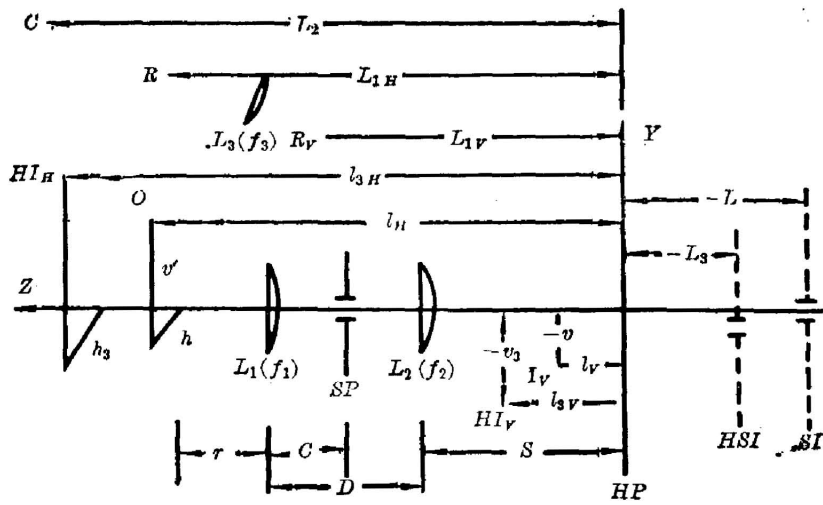


图 1 像散一步彩虹全息 L-S-L 系统记录光路

Fig. 1 L-S-L recording configuration in astigmatic one-step rainbow holographic process

像散一步彩虹 L-S-L 系统的再现像的垂直方向放大率由全息放大率和透镜系统的放大率的乘积给出,即

$$\begin{aligned} \partial v_3 / \partial v' &= \{1 + (\lambda_1 / \lambda_2) (l_V / L_2) - (l_V / L_{1V})\}^{-1} \\ &\times \{[(S - l_V - f_2)(D - f_1) - (S - l_V) f_2] (f_1 f_2)^{-1}\} \\ &= (\lambda_2 / \lambda_1) (l_{3V} / l_V) \{[(S - l_V - f_2)(D - f_1) - (S - l_V) f_2] (f_1 f_2)^{-1}\}. \end{aligned} \quad (1)$$

水平方向的放大率与柱面透镜  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  的存在无关,只需考虑全息放大率,所以水平方向的放大率为

$$\partial h_3 / \partial h = [1 + (\lambda_1 / \lambda_2) (l_H / L_2) - (l_H / L_{1H})]^{-1} = (\lambda_2 / \lambda_1) (l_{3H} / l_H). \quad (2)$$

为使观察者从再现缝像的位置看到没有畸变的物的再现像,根据几何关系可以证明,垂直方向和水平方向的放大率必需满足匹配条件

$$-(\partial v_3 / \partial v') / (l_{3V} - L_3) = (\partial h_3 / \partial h) / (l_{3H} - L_3). \quad (3)$$

因为物本身总有一定深度,一般地说物上不同深度的点是不能同时满足匹配条件的,所以我们定义比值

$$\delta = \{[-(\partial v_3 / \partial v') / (l_{3V} - L_3)] - [(\partial h_3 / \partial h) / (l_{3H} - L_3)]\} / [(\partial h_3 / \partial h) / (l_{3H} - L_3)] \quad (4)$$

来衡量再现像垂直方向和水平方向的失配程度。下面讨论两种特殊情况的失配度。

(1) 像散一步彩虹全息的孔径共轭技术<sup>[4,6]</sup>;

这一技术用焦距为  $F$  的单个透镜成像,它是 L-S-L 系统的参量  $D=0$ ,  $f_1=f_2=f=2F$  的特殊情况。经简单计算后,得失配度

$$\delta_0 = -[l_H(1/L_{1H} - 1/L_{1V} + 1/L - 1/l_H)(1 - l_V/L)^{-1}][(S - F - l_V)(F)^{-1}] - 1. \quad (5)$$

Chen 等对参量的选取为  $F=9\text{ cm}$ ,  $L_{1V}=9\text{ cm}$ ,  $L_{1H}=50\text{ cm}$ ,  $L=S=14\text{ cm}$ ,  $l_H=39\text{ cm}$ 。代入后得

$$\delta_0 \approx -0.13l_V / (1 - 0.7l_V). \quad (6)$$

失配度  $\delta_0$  对  $l_V$  的关系曲线如图 2 所示。对于一步彩虹全息,  $l_V$  达 2cm 左右,再现像仍然可以是清晰的。由(6)式或  $\delta_0$  曲线看出,  $l_V$  在 +2cm 和 -2cm 处的失配度分别为 -30%

和 +23%。我们若假定人的视觉能忍受的失配度范围为  $-5\% \sim +5\%$ ，则相应的  $l_V$  的值

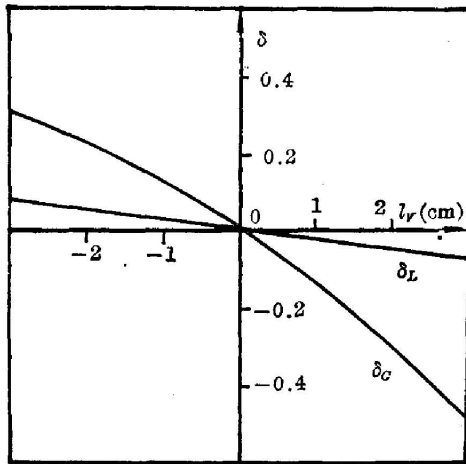


图 2 失配度曲线

Fig. 2 Curves of unmatched degree

只能取  $+0.39 \sim -0.40$  cm，那么物的景深只有 2.6 cm。像散彩虹孔径共轭技术由于垂直方向和水平方向的失配问题，使所拍摄物的景深受到严重限制。实际上，这也是单个透镜成像系统共同存在的问题。由(5)式看出，要使  $\delta_O \approx 0$ ，必需有  $L \gg l_V = 2$  和  $S - F \gg l_V = 2$ 。L 的选择比较任意，而  $S - F$  较大时会使所摄物的景深减小。如选  $S = 2F$  时，最佳情况下物的景深也只有 4 cm。

(2) 像散一步彩虹全息 L-S-L 技术:

由(4)式计算得失配度为

$$\delta_L = [l_H(1/L_{1H} - 1/L_{1V} + 1/L - 1/l_H) \times (1 - l_V/L)^{-1}] \{ [(S - l_V - f_2)(D - f_1) - (S - l_V)f_2] (f_1 f_2)^{-1} \} - 1. \quad (7)$$

我们若选取  $D = f_1 + f_2$  和  $L = -40$  cm，则

$$\delta_L = l_H(1/L_{1V} - 1/L_{1H} + 1/40 + 1/l_H)(1 + l_V/40)^{-1}(f_2/f_1) - 1. \quad (8)$$

令  $l_V = 0$  时， $\delta_L|_{l_V=0} = 0$ ，即有当

$$l_H(1/L_{1V} - 1/L_{1H} + 1/40 + 1/l_H)(f_2/f_1) = 1 \text{ 时}, \quad (9)$$

$$\delta_L = -l_V/(40 + l_V). \quad (10)$$

图 2 中的  $\delta_L$  曲线根据(10)式画出。当  $l_V$  等于 +2 cm 和 -2 cm 时，失配度各为  $-5\%$  和  $+5\%$ ，恰在视觉能忍受的范围之内。设柱面透镜的焦距  $f_1 = 16$  cm 和  $f_2 = 8$  cm，并取  $S = 8$  cm 时，由成像几何关系计得物的景深为 16 cm。只要我们适当选择参量，所摄物的景深还可进一步提高。

### 三、实 验

为了能得到合适的视场和强的立体感， $L_1$  和  $L_2$  两柱面透镜需有较大的长度和宽度。我们用厚的有机玻璃平板在车床上加工成半径为 7.2 cm，长和宽各为 14 cm 和 8.5 cm 的平凸柱面透镜。对于  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$  的红光，焦距约为 15.6 cm 的作为  $f_1$ 。将两只平凸柱面透镜并合成一只双凸柱面透镜，其焦距约为 7.8 cm，作为  $f_2$ 。有机玻璃柱面透镜经研磨后，透明度还是好的。

将  $f_1$  和  $f_2$  的值代入(9)式。为方便起见，我们选  $l_H \approx 45$  cm 和  $L_{1H} \approx 45$  cm，计得  $L_{1V} \approx 45$  cm。再由成像的几何关系，当  $L = -40$  cm 时计得  $O = 14$  cm；当取  $S = 7.6$  cm 时，物组的景深可达 20 cm，起点离  $L_1$  约 5 cm，末端离  $L_1$  约 25 cm。

根据上述参量按排光路。我们用 20 mW 的氦氖激光器拍摄了两个物组的彩虹全息图，其中心位置离干板约 45 cm。一组由两个轴向相距为 20 cm 的相同圆环组成，圆环的内径和外径各为 1.7 cm 和 3 cm，以观察不同位置物体的失配程度。另一组由两只轴向相距为

20 cm 的陶瓷小动物鸡和虎组成, 鸡长 3.5 cm 和虎长 4 cm, 以观看再现像的细节, 判辨全息像的清晰度。同时还可以从全息图的不同位置观看两像的遮盖程度, 以显示再现像的立体性。

再现照明光源用 6 V 15 W 灯泡, 灯丝长度约 2 mm。为了保证整个物组再现像都能有较好的清晰度, 我们用不同的狭缝宽度作了一些定性测试。当缝宽 6 mm 时, 物组最大景深约 10 cm。超过这个限度时, 物组的远端将出现色模糊; 缝宽 4 mm 时, 最大景深约 15 cm; 缝宽为 2 mm 时, 物组景深为 20 cm, 仍能得到清晰的像。

将照明光源放在参考点光源的位置附近来观看红色再现像时, 水平方向像的放大率约等于 1, 其位置基本上就是原来物的位置。因为垂直维像和水平维像的放大率是匹配的, 所以物组再现像的轴向位置和横向尺寸都和原物组情况基本相同。

我们用 5 cm × 14 cm 的干板拍摄了两个物组的像散彩虹全息图。相距 20 cm 的两个圆环基本上仍保持圆形, 如图 3(a) 所示, 说明垂直维像和水平维像的匹配是良好的。相距 20 cm 的鸡和虎的再现像是清晰的, 当眼睛从全息图的左端移向右端, 鸡和虎的像从完全分离过渡到完全重叠, 如图 3(b) 和 (c) 所示, 有很强的深度感和立体感。因为再现像的波是像散的, 而且物组景深较大, 图 3 中照片是将照相机放在全息图前约 70 cm, 光圈为 1/22 的情况下拍摄的, 负片中“物”的线度只 1 到 2 mm, 而后放大成图中照片。

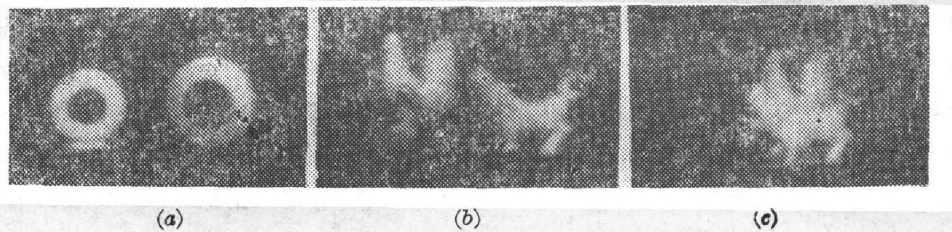


图 3 白光再现像照片

Fig. 3 Photographs of white-light-reconstructed images

#### 四、讨 论

L-S-L 系统摄制像散彩虹全息图的主要特点是景深可达或超过 20 cm, 其缺点是垂直方向视场受到透镜尺寸较大限制, 而且景深越大, 限制越严重。虽然增大柱面透镜的口径可以加宽视场, 但技术上的复杂性也增加了。所以 L-S-L 技术与孔径共轭技术各有其运用的侧面, 前者适用于景较深、视场较狭而后者适用于景较浅、视场较宽的情况。因为物组景深有 20 cm, 照明物体的光束若采用单束光扩束法, 则照明范围必须很大, 物光较弱, 且经物组内物体反射的物光束和参考光束的程差可高达 20 cm 左右。为了得到较强的物光和减小光程差, 我们采用了分束照明法。另外, 在离开柱面透镜较远的物体, 其全息像容易出现色模糊, 减小缝宽度可以降低色模糊现象, 但会使射到干板上的物光变弱, 而且衍射现象会使像的边缘模糊。在摄制像散彩虹全息图的过程中, 必需考虑上述的矛盾关系。

#### 参 考 文 献

- [1] H. Chen, F. T. S. Yu; *Opt. Lett.*, 1978, 2, No. 4 (Apr), 85.

- [2] E. N. Leith, H. Chen; *Opt. Lett.*, 1978, **2**, No. 4 (Apr), 82.  
[3] H. Chen; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 22 (Nov), 3728.  
[4] H. Chen *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (Oct), 3557.  
[5] 厉志明, 任鸿耀, 刘淑辉; 《光学学报》, 1984, **4**, No. 12 (Dec), 1094.  
[6] 陈桂丛, 单启蜚; 《激光》, 1982, **9**, No. 11, 685.

## Deep-scene 3-D imaging technique of L-S-L system in astigmatic one-step rainbow holography

LIU SHUHUI AND LI ZHIMING

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 3 October 1984; revised 5 April 1985)

### Abstract

Using an L-S-L imaging system in astigmatic one-step rainbow holographic process, we obtained rainbow holograms of a set of objects with depth of 20 cm and departure from holographic plate about 50 cm. When the primary image was reconstructed with a white light point source, a clear, distortionless, highly stereoscopic and orthoscopic quasimonochromatic deep-scene 3-D image was displayed.