

单凹面镜一步周视彩虹全息术*

江朝川 郭履容

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

提要 提出一种简便实用的一步周视彩虹全息方法, 只需用单个凹面镜成像, 便能一步记录可360°观察的平板彩虹全息图。给出了获得重现正像的条件, 讨论了全息像差的影响, 并提出了减小甚至消除全息像差的方法。

关键词 彩虹全息术, 周视, 正像, 全息像差

One-step panoramic rainbow hologram with a concave mirror

JIANG Chaochuan, GUO Lirong

(Information Optics Institute, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract A simple one-step method is presented of making 360° rainbow hologram on a plane holographic plate using a concave mirror, which is called panoramic rainbow hologram. The conditions to obtain restructured orthoscopic image are given, and the method of eliminating holographic aberrations is presented based on the analysis and discussions of the aberrations.

Key words rainbow hologram, panoramic view, orthoscopic image, aberrations

1 引言

周视彩虹全息图, 由于可提供360°的视角, 实现平板彩虹全息图的周视观察效果, 因而具有可观的应用前景。我们在文献[1]所述两步法的基础上, 曾提出一种利用双凹面镜作成像系统记录周视彩虹全息图的一步方法^[2], 由于省去了严格的共轭再现过程, 勿需精确的复位及对准并对记录干板乳胶的涨缩没有要求, 因而易于取得满意的实验结果。本文进一步简化记录系统, 提出一种只用单个凹面镜的腰像记录光路, 不仅可获得腰像周视彩虹全息图, 而且在一定条件下也可获得物体的重现正像。

2 记录方法

记录光路如图1(a)所示。图中SM为中心部分开孔的凹面镜, 其上置一圆环状狭缝S, 物

收稿日期: 1992年5月4日; 收到修改稿日期: 1992年9月14日。

* 本工作得到国家自然科学基金的资助。

体顶部面向凹面镜,且距其顶点的距离为 $2f$,并置于光轴的上方。照明光束通 SM 的开孔,从上方正对照明物体,物光经 SM 反射后仍然成像于 $2f$ 处,只是物像位于光轴的下方。将全息干板置于实像处,参考光亦从 SM 的开孔引入,垂直入射记录全息图 H 。

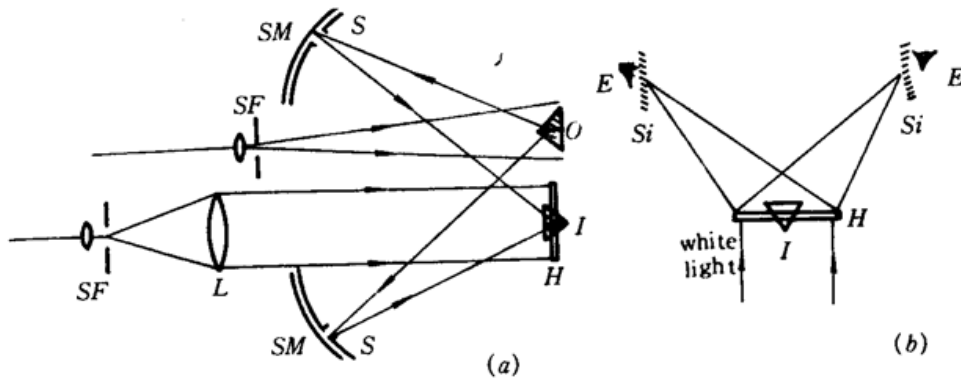


Fig. 1 Recording (a) and reconstruction (b) of the panoramic rainbow hologram

再现时,将 H 水平放置,用共轭光照明,则圆环狭缝的实像将位于 H 上方适当位置,人眼通过这一环状观察窗即可对再现像进行周视观察(如图 1(b) 所示)。观察效果仿佛物体置于全息图上,立体感十分强烈。由于物体经单个凹面镜成的像沿光轴方向的凸凹与原物相反,所以, H 再现的像是一个贗像。

3 正像的获得

对普通一步彩虹全息术,已有利用贗像光路获得重现正像的报道^[3,4]。这里,我们采用图 2(a) 所示的光路记录周视彩虹全息图,让参考光源到干板的距离小于环状狭缝到干板的距离,再现时用较参考光源远的光源照明(见图 2(b)),同样可以获得周视正像。

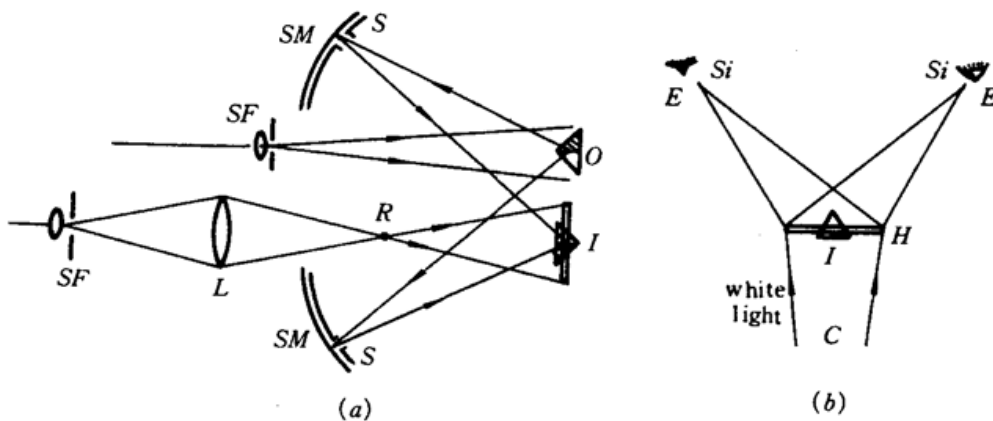


Fig. 2 Recording (a) and reconstruction (b) of orthoscopic image panoramic rainbow hologram

由全息物像关系可知,再现狭缝像的 z 坐标为

$$z_{si} = \frac{z_S z_R z_C}{z_S z_R + \mu z_C (z_R - z_S)} \tag{1}$$

式中 $\mu = \lambda/\lambda_0$, 由此式可求得 $z_{si} > 0$, 即让狭缝像成为全息图右方的实像的条件为

$$\begin{cases} z_S < z_R < 0 \\ z_C < z_S z_R / \mu (z_S - z_R) < 0 \end{cases} \tag{2}$$

由此可知,只要用较狭缝距离短的参考光进行记录,用较狭缝距离更远且满足(2)式的光源照明再现,便可将狭缝像移到干板右边成为实像,从而观察到物体的再现正像。例如,取 $\mu = 1, z_R = -200 \text{ mm}, z_S = -350 \text{ mm}, z_C = -1500 \text{ mm}$, 则 $z_{Si} = 670 \text{ mm}$, 如环状狭缝直径 $D_S = 360 \text{ mm}$, 则再现狭缝像的直径 $D_{Si} = z_{Si}D_S/z_S = 689 \text{ mm}$, 故观察时的倾斜角为 $\theta = \text{tg}^{-1}(D_{Si}/2z_{Si}) = 27^\circ$ 。

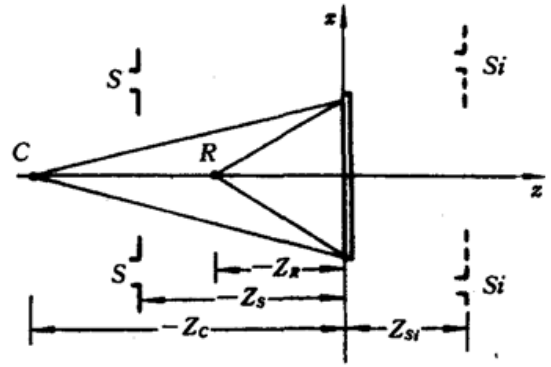


Fig. 3 Parameters of optical arrangement

4 全息像差的影响

本文所述的周视一步彩虹全息术在分辨率、色模糊等方面与普通一步彩虹全息术基本相同,同时,记录和再现时采用不同曲率半径的光源所引起的像的放大、缩小以及像的清晰度、立体感等问题也与普通一步彩虹全息相同,这里无须赘述。不过,由于两者物光和参考光的相对位置完全相反,因而全息像差对两者的影响很不相同。本节我们就此问题作一讨论。

对彩虹全息过程,由再现像面上光场复振幅分布的表达式,采用 Meier 的像差计算方法^[5]可得三级像差公式为^[6]

$$Q = -\frac{r^4}{8}S + \frac{r^3}{2}(C_x \cos\theta + C_r \sin\theta) - \frac{r^2}{4}F - \frac{r^2}{2}(A_x \cos^2\theta + 2A_r \sin\theta \cos\theta + A_r \sin^2\theta) + \frac{r}{2}(D_x \cos\theta + D_r \sin\theta) \quad (3)$$

式中 $r \cos\theta = x, r \sin\theta = y, S$ 表示球差, C_x 和 C_r 表示慧差, A_x, A_r 和 A_r 表示像散, F 为场曲, D_x 和 D_r 为畸变。5 种像差的表达式均列于表 1。

在普通彩虹全息像差公式中令 $x_R = y_R = 0, x_c = y_c = 0$, 便可得周视彩虹全息的像差公式,结果列于表 1 中。表中 x_i, y_i 和 z_i 为像点坐标,对普通彩虹全息有

$$z_i = \frac{z_o z_R z_c}{z_o z_R + \mu z_R z_c - \mu z_o z_c} \quad (4)$$

$$x_i = z_i \left(\frac{x_c}{z_c} + \mu \frac{x_o}{z_o} - \mu \frac{x_R}{z_R} \right) \quad (5)$$

$$y_i = z_i \left(\frac{y_c}{z_c} + \mu \frac{y_o}{z_o} - \mu \frac{y_R}{z_R} \right) \quad (6)$$

对周视彩虹全息,由于 $x_R = y_R = x_c = y_c = 0$, 所以像点坐标简化为

$$z_i = \frac{z_o z_R z_c}{z_o z_R + \mu z_R z_c - \mu z_o z_c} \quad (7)$$

$$x_i = \frac{\mu x_o}{z_o} z_i \quad (8)$$

$$y_i = \frac{\mu y_o}{z_o} z_i \quad (9)$$

分析表 1 中所列各种像差表达式,并结合物像关系(4)~(9)式,可以看出:

(1) 无论是普通彩虹全息还是周视彩虹全息,只要再现光与参考光相同(可以是点源,也可以是平行光)且 $\mu = 1$, 则 $z_i = z_o, x_i = x_o, y_i = y_o$, 各种像差均为 0, 这时得到的是一个无像差的

像;

(2) 参考光与再现光源位置不同时,两种彩虹全息图均有像差。由于 $x_R = y_R = x_c = y_c = 0$, 因而周视彩虹全息图的像差较普通彩虹全息图小。对前者令 $\mu = 1$, 对后者令 $\mu = 1$, 且 $x_R/z_R = x_c/z_c$, $y_R/z_R = y_c/z_c$, 则两者均可消除畸变;

(3) 对周视彩虹全息图,若让 $z_c \rightarrow \infty$, 且 $\mu = 1$, 只要 z_0 较小而 z_R 相对较大, 则有 $z_i \rightarrow z_0$, $x_i \rightarrow x_0$, $y_i \rightarrow y_0$, 这时, 各种像差趋于极小, 几乎近于零。

可见, 当我们想要获得正像周视彩虹全息图时, 可以采用图 2 所示的光路进行记录和再现, 只要再现光源距离很大, 甚至用平行光再现, 便能使像差很小甚至消除像差。

Table 1 Holographic aberrations of conventional and panoramic rainbow holograms

Name	Conventional rainbow holograms	Panoramic rainbow holograms
Spherical aberrations	$S = \frac{\mu}{z_R^3} - \frac{\mu}{z_0^3} + \frac{1}{z_i^3} - \frac{1}{z_c^3}$	$S = \frac{\mu}{z_R^3} - \frac{\mu}{z_0^3} + \frac{1}{z_i^3} + \frac{1}{z_c^3}$
Coma	$C_x = \frac{\mu}{z_R^3} x_R - \frac{\mu}{z_0^3} x_0 + \frac{x_i}{z_i^3} - \frac{x_c}{z_c^3}$ $C_y = \frac{\mu}{z_R^3} y_R - \frac{\mu}{z_0^3} y_0 + \frac{y_i}{z_i^3} - \frac{y_c}{z_c^3}$	$C_x = -\frac{\mu}{z_0^3} x_0 + \frac{x_i}{z_i^3}$ $C_y = -\frac{\mu}{z_0^3} y_0 + \frac{y_i}{z_i^3}$
Astigmatism	$A_x = \frac{\mu x_R^2}{z_R^3} - \frac{\mu x_0^2}{z_0^3} + \frac{x_i^2}{z_i^3} - \frac{x_c^2}{z_c^3}$ $A_{xy} = \frac{\mu x_R y_R}{z_R^3} - \frac{\mu x_0 y_0}{z_0^3} + \frac{x_i y_i}{z_i^3} - \frac{x_c y_c}{z_c^3}$ $A_y = \frac{\mu y_R^2}{z_R^3} - \frac{\mu y_0^2}{z_0^3} + \frac{y_i^2}{z_i^3} - \frac{y_c^2}{z_c^3}$	$A_x = -\frac{\mu x_0^2}{z_0^3} + \frac{x_i^2}{z_i^3}$ $A_{xy} = -\frac{\mu x_0 y_0}{z_0^3} + \frac{x_i y_i}{z_i^3}$ $A_y = -\frac{\mu y_0^2}{z_0^3} + \frac{y_i^2}{z_i^3}$
Curvature of field	$F = \frac{\mu}{z_R^3} (x_R^2 + y_R^2) - \frac{\mu}{z_0^3} (x_0^2 + y_0^2)$ $+ \frac{1}{z_i^3} (x_i^2 + y_i^2) - \frac{1}{z_c^3} (x_c^2 + y_c^2)$	$F = -\frac{\mu}{z_0^3} (x_0^2 + y_0^2) + \frac{1}{z_i^3} (x_i^2 + y_i^2)$
Distortion	$D_x = \frac{\mu x_R^3}{z_R^3} - \frac{\mu x_0^3}{z_0^3} + \frac{x_i^3}{z_i^3} + \frac{x_c^3}{z_c^3}$ $D_y = \frac{\mu y_R^3}{z_R^3} - \frac{\mu y_0^3}{z_0^3} + \frac{y_i^3}{z_i^3} + \frac{y_c^3}{z_c^3}$	$D_x = -\frac{\mu x_0^3}{z_0^3} + \frac{x_i^3}{z_i^3}$ $D_y = -\frac{\mu y_0^3}{z_0^3} + \frac{y_i^3}{z_i^3}$

5 实验及结果

实验所用凹面镜为半径 $r = 400$ mm 的球面镜, 其孔径为 380 mm, 中间部分开孔的直径为 200 mm, 环状狭缝 S 的直径为 $D_s = 360$ mm, 宽度为 $W = 7$ mm, 物体为一小玩具飞机运载车。首先用图 1 光路记录了一张周视彩虹全息图, 用共轭白光再现时, 可对物体的像进行周视观察。

用图 2 所示光路和第三节末所列实验数据, 我们拍摄了另一张正像周视彩虹全息图。再现时, 若 $z_c = -1500$ mm, 则 $z_{i1} = 670$ mm, 若用平行光再现即 $z_c \rightarrow \infty$, 则 $z_{i1} = 467$ mm。实际观察结果与计算相符。周视观察所看到的再现像各侧面均清晰逼真, 立体感甚强, 其结果令人满意。图 4 为从不同方位拍摄的再现像照片。

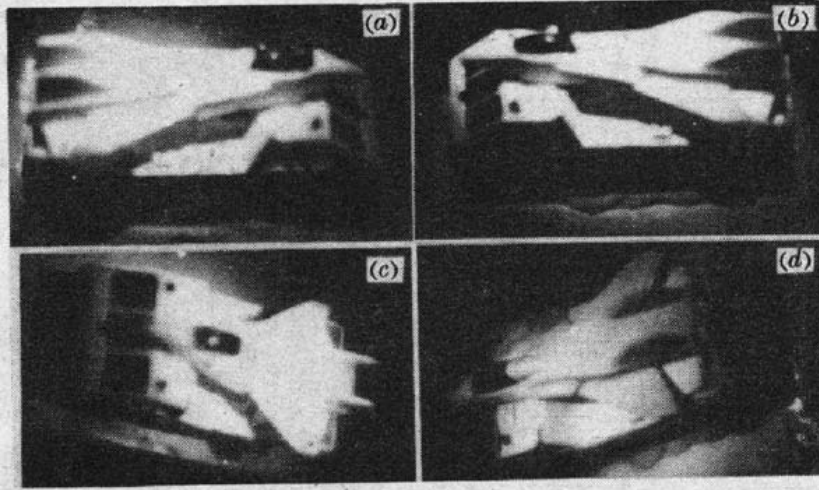


Fig. 4 Pictures of reconstructed orthoscopic images photographed at different viewing positions

参 考 文 献

- 1 王典民, 哈流柱 *et al.*, 光学学报, **10**, 996(1990)
- 2 江朝川, 张晓春 *et al.*, 光学学报, (待发表)
- 3 S. A. Benton, H. S. Mingace Jr; *SPIE*, **215**, 156(1980)
- 4 H. Chen, Q. Z. Shan *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**, 3557(1981)
- 5 R. W. Meier, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 987(1965)
- 6 Y. W. Zhang, W. G. Zhu *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**, 164(1983)