

横向面积分割法及其在二维/三维 模压全息图中的应用

谢敬辉 赵业玲 于美文
(北京工业学院工程光学系)

提 要

本文提出制造二维/三维模压全息图(又称分层模压全息图)的一种新方法——横向面积分割法,详细介绍了基本原理,设计思想和计算公式。此外,还提出了应用色序双循环或多循环技术增大垂直方向视角、应用定向散斑屏增大水平方向视角的新方法。成功地制造了质量满意的二维/三维模压全息图。
关键词: 彩虹全息图, 模压全息图。

一、引 言

全息图的模压复制是近十多年发展起来的一项新技术,它是将全息显示技术从实验室引向商业和艺术等应用领域的一条重要途径。由于模压全息图适合白光显示,能大批量生产,成本低廉,便于保存,目前已广泛地应用于书籍插图,商业广告、艺术装璜,证件卡通等方面,发挥出越来越大的经济和社会效益。文献[1~5]详细介绍了一般模压全息图的原理和制造工艺,文献[6,7]则介绍了模压全息图的一种新品种——二维/三维全息图的设计和制造工艺。

二维/三维模压全息图又称为分层模压全息图(Laminated embossing hologram)它是利用多层三维图形或几层二维图形与1至2个三维物体组合形成的白光显示全息图。由于模压全息图要求白光显示,通常记录成彩虹全息图或像平面全息图。过去制造原版二维/三维全息图一般采用多次重复曝光的一步法或二步法^[7],在光致抗蚀剂上记录,然后经过电铸金属模板,模压加工等工艺过程制成产品。在多次重复曝光的一步法中,要在同一张光致抗蚀剂底片上对每一个二维图形记录一个彩虹全息图,记录周期很长。在多次重复曝光两步法中,有两种可供选择的方式。(1)对每一个层次记录一张主全息图,然后依次用这些主全息图的再现实像在光致抗蚀剂上记录彩虹全息图。(2)重复曝光,将各个层次依序记录在同一张主全息图上,然后通过二步过程,在光致抗蚀剂上形成浮雕全息图。采用第一种方式,除工作周期长之外,还很不容易作到各层次之间精确对准。采用第二种方式,由于在同一底片面积上重复曝光,必然导致衍射效率的下降。此外,除非在多次曝光中调整参考光的方向,否则再现像只有单一颜色。

为了克服上述困难,本文提出一种新的记录方法——横向面积分割法,并在设计中应用色序双循环或多循环技术以及定向散斑屏,扩展了垂直方向和水平方向的视角。

二、基本原理和记录过程

横向面积分割法是对两步法彩虹全息的改进。第一步,按图1所示的光路记录一张横向面积分割的主全息图。第二步,采用图2所示的光路一次合成二维/三维浮雕全息图。

图1中, P_1, P_2, \dots, P_i 分别是要记录的各层透明片, D_1, D_2, \dots, D_i 则是与透明片紧贴的散射屏。参考光束 R_M 的倾斜角为 θ_R 。在全息底片 H_M 前面放置一个垂直于光轴平面的可移动狭缝 S 。利用 S 的横向移动,可依次将第 i 个二维透明片的信息记录在主全息图 H_M 的第 i 个元面积 H_{M_i} 上,各个条形全息图 $H_{M_1}, H_{M_2}, \dots, H_{M_i}$ 组合在一起,就构成了一个横向面积分割全息图 H_M 。

当构图中包含有三维物体时,可采用图3所示的光路,通过反射镜 M 的移动,很容易将透射照明改变为散射照明。

在光致抗蚀剂底片上记录浮雕全息图可采用图2所示的光路。照明光束沿 R_M 的共轭方向照明主全息图 H_M ,各条形全息图元再现的实像作为物光波,和另一束参考波 R 干涉,直接在光致抗蚀剂底片上形成分层的彩虹全息图。

和过去采用的多次重复曝光方法比较,横向面积分割法有以下几个优点。(1)在用主全息图 H_M 记录浮雕型彩虹全息图的过程中(图2),没有明显地使用狭缝,因为对主全息图已作了横向面积分割,每一个条形全息图元的边界在实际上起到了狭缝的作用。这样,对光致抗蚀剂底片曝光的物体光波几乎是从整个全息图面积上衍射的光波,而不仅仅是从单一条狭缝衍射的光波。这样大大提高了光能利用率,在一定程度上解决了光致抗蚀剂感光灵敏度低的问题,有利于记录大面积的模压全息

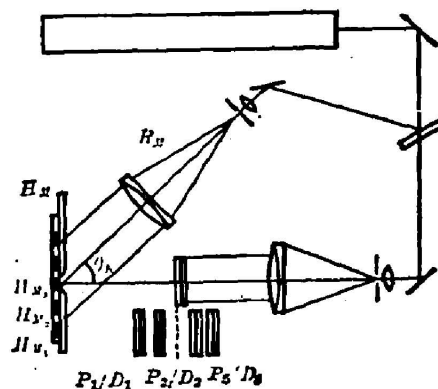


Fig. 1 Master hologram geometry containing 2D objects only

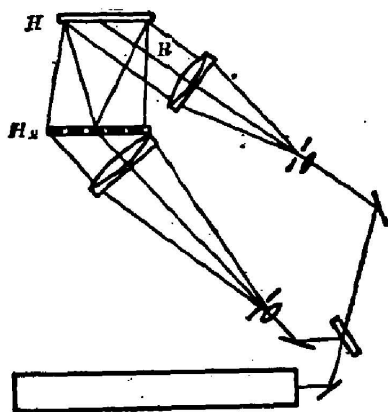


Fig. 2 2D/3D hologram geometry

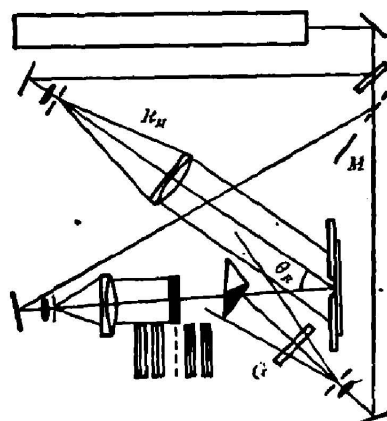


Fig. 3 Master hologram geometry containing both 2D objects and 3D objects

图。(2)从根本上克服了记录周期长这个缺点。在记录主全息图时,可使用感光灵敏度高的银盐记录材料,只要得到一个高质量的主全息图,一次曝光就可以形成二维/三维的浮雕全息图。(3)在主全息图上,不同层次的图像记录在底片上不同的横向位置上,这不仅有利于提高衍射效率,而且通过设计和计算,可以人为地控制各层次再现像的颜色,实现再现像的彩色化。(4)由于将多层次图像记录在同一张全息图上,只要在记录过程中,目标实现了精确对准,且整个记录过程中不改变底片位置,则再现的二维/三维像的位置总能够精确重合,这就解决了二维/三维全息图的对准问题。

三、二维/三维全息图设计

一张高质量的二维/三维全息图,除了要求再现像明亮、清晰,具有精巧的艺术构思之外,更重要的是要求再现像具有合理的颜色分布,并且具有尽可能大的视角。为此,必须对各个记录参数进行精确的计算和严格的控制。

1. 色散窗口的计算

由图 2 看出,当用一束白光沿参考光的共轭方向照明彩虹全息图时,在主全息图 H_M 附近,将形成一个彩色的观察窗口,这个观察窗口的空间分布和颜色分布完全决定了再现像的颜色和视角等特性。下面来计算这个彩色观察窗口的颜色和空间分布。

取图 4 所示的坐标系, H_i 代表第 i 个条形全息图元,其位置坐标为 (x_0, z_0) ,参考光的倾斜角为 θ_R 。图 5 是相应的再现光路,用一束白光沿参考光共轭方向照明全息图 H ,照明光束倾斜角为 θ_c 。显然再现的观察窗空间位置将随波长改变。设记录波长为 λ_0 ,再现光波长为 λ ,则可导出波长 λ 对应的观察窗 H'_i 的空间坐标 (x_i, z_i) 为

$$x_i = x_0 - z_0 [(\lambda_0/\lambda) \sin \theta_c + \sin \theta_R], \quad (1)$$

$$z_i = (\lambda_0/\lambda) z_0. \quad (2)$$

实例计算了 $\lambda_0 = 457.9 \text{ nm}$, 条形全息图元位置在 $-60 \text{ mm} \leq x_0 \leq 60 \text{ mm}$, $z_0 = -300 \text{ mm}$, θ_R 分别为 50° 和 60° 时,色散窗口的空间位置分布。计算结果分别画在图 6 和图 7 中。图中每一条斜线代表一个位于 x_0 的条形全息图元的色散曲线。曲线上的每一个短竖线则表示了色散窗口透过的中心波长。当眼睛位于某一色散窗口位置时,就能观察到再现像的相应

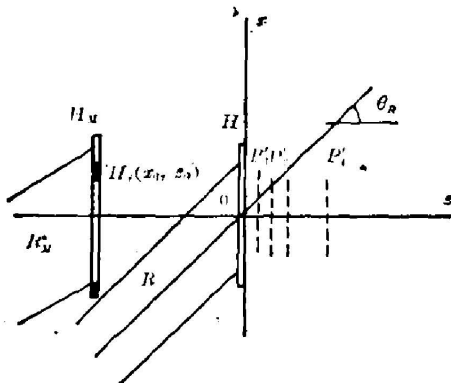


Fig. 4 Coordinate system for calculating the dispersion of viewing window

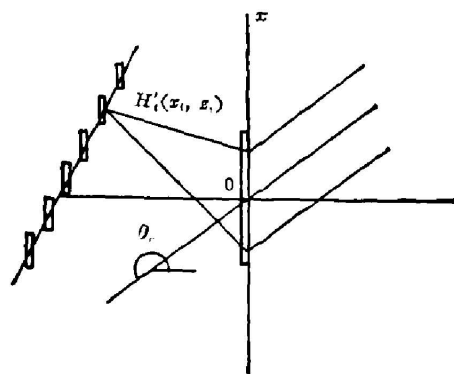


Fig. 5 Reconstruction of viewing window

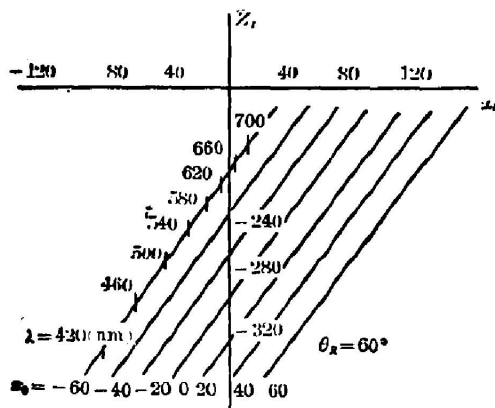


Fig. 6 Dispersion curves of viewing windows for a reference angle of 50°

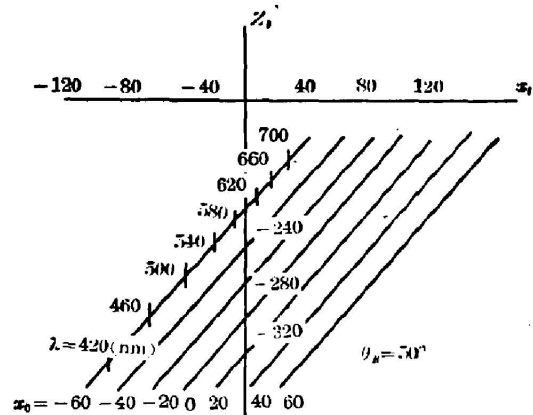


Fig. 7 Dispersion curves of viewing window for a reference angle of 60°

层次和相应颜色。

计算结果表明,色散窗口的空间位置沿直线分布。实际上,将公式(1)代入公式(2),直接可得到不同横向位置的条形全息图元的色散窗口位置为

$$z_i = (x_0 - x_i - z_0 \sin \theta_R) / \sin \theta_c, \quad (3)$$

直线的斜率

$$\gamma = -(1/\sin \theta_c). \quad (4)$$

当再现光波与参考波共轭时,于是

$$\gamma = (1/\sin \theta_R). \quad (5)$$

观察窗沿 x 方向的色散称为横向色散,沿 z 方向的色散称为纵向色散,利用公式(1)~(5),得横向和纵向色散分别为

$$\Delta x_{ix} = z_0 \lambda_0 \Delta \lambda / \lambda^2 \gamma, \quad (6)$$

$$\Delta z_{ix} = \gamma \Delta x_{ix} = z_0 \lambda_0 \Delta \lambda / \lambda^2. \quad (7)$$

上式表明,当记录波长 λ_0 和条形全息图的位置 z_0 确定时,观察窗的横向色散完全由斜率 γ 或参考角 θ_R 决定,并直接影响着观察效果。对于用横向面积分割技术制作的二维/三维全息图来说,只有当眼睛位于各个条形全息图元的观察窗重叠范围之内时,才能同时看清各个层次的再现像。因此通过增大参考角 θ_R ,减小色散曲线斜率来增大横向色散 Δx_{ix} 是有利的,这样可以增大各观察窗的重叠范围,增大垂直方向视角。

纵向色散的存在对于观察二维/三维全息图是一个不利因素。为了观察到不同的颜色分布,眼睛不仅要沿 x 方向移动,还要沿 z 方向移动,否则会出现渐晕效应^[8]。因此尽量减小纵向色散是有好处的。但从公式(7)看出,当 λ_0 、 $\Delta \lambda$ 、 z_0 一定时,纵向色散与 γ 无关,解决这一问题暂时还没有更好的办法。

2. 全息图元的宽度和间隔的确定

条形全息图元的宽度可由观察时所要求的像的单色性和允许的像的色模糊来确定,这在许多文献中都有详细的讨论^[9,10],本文着重讨论条形全息图元的间隔。假设各条形全息图元之间的间隔相等(当然,以像的颜色分布考虑,也可不等间隔),为了在尽量大的范围内能同时看清各层次的像,在横向面积分割时必须满足

$$d < |\Delta\alpha_{ix}/N|, \quad (8)$$

式中 d 是条形全息图的间隔, $\Delta\alpha_{ix}$ 为观察窗的横向色散范围, N 为记录二维图像的层数。在这个容限范围内, 可以合理地设计各层次的颜色。由图 6 和图 7 看出, 间隔 d 越小, 再现像的垂直视角就越大。但各层次像的颜色变化范围减小, 因此设计时应在这二者之间取一折衷。本文按上面计算结果, 设计了一个三层五色的分层模压全息图, 原稿是一幅彩色铅笔广告(图 8)。记录参数是: $\lambda_0 = 457.9 \text{ nm}$, $z_0 = -300 \text{ mm}$, $\theta_R = 50^\circ$, 条形全息图 $a = 6 \text{ mm}$, 长度 $L = 240 \text{ mm}$, 各条之间间隔 $d = 10 \text{ mm}$ 。为了减小再现像的畸变和各层之间的错位, 在记录主全息图和浮雕全息图时都使用波长为 457.9 nm 的氩激光, 记录材料则分别使用天津 III 型高衍射效率全息干板和国产的 BP-212 光致抗蚀剂。图 9 画出了各条形全息图以及相应的色散窗口分布示意图。当眼睛在位置 Q 时, 可看到第一层 a, b 分别呈现红色和绿色, 第二层 c, d 分别呈现橙色和兰色, 第三层 e 呈现黄色。图 10 是再现像的照片。

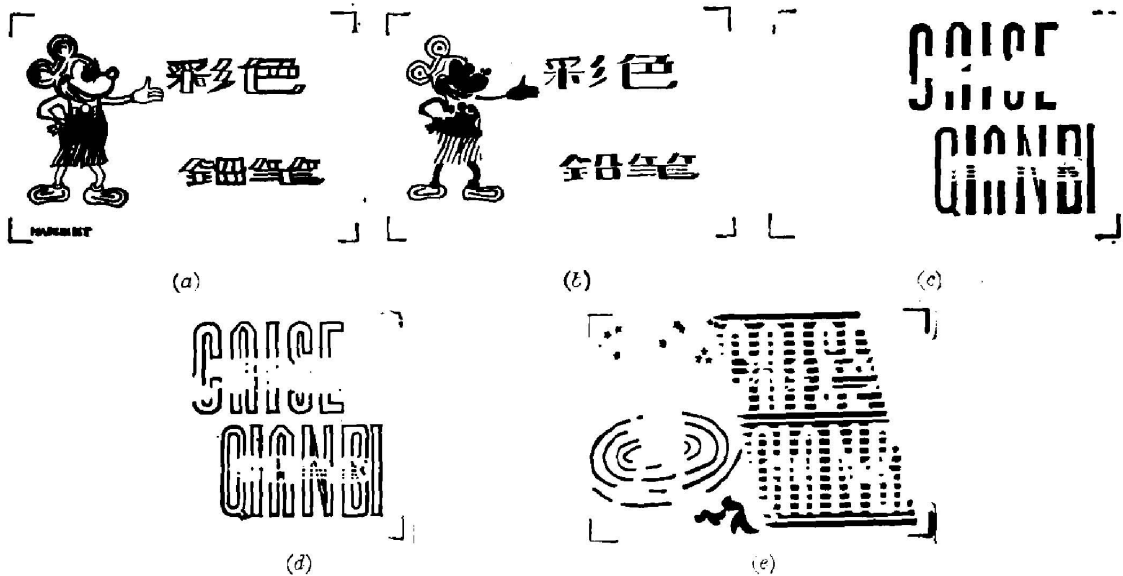


Fig. 8 Original 2D transparencies: a) and b) are the front layer, c) and d) the middle layer, and e) the bottom layer

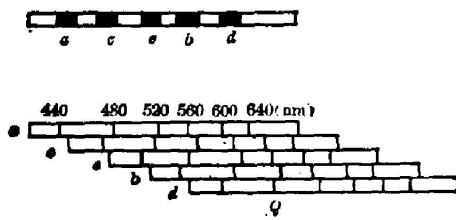


Fig. 9 A typical example of the viewing window

[图 10, 请参见本期彩色插页——7]

Fig. 10 A sample of 2D/3D embossing hologram

[Please see colour plate——7]

3. 原稿的设计

在二维图像原稿的设计上, 有两个问题必须引起注意。第一, 二维图像应按透视中投影相似原理进行放大率调整^[7], 以保持正确的体视关系。这一要求, 对于医疗上应用的二维/三维全息图显得特别重要(如 CT 图像的三维显示), 但是在一般的显示中, 则可以适当降低。第二, 在设计原稿时, 应保证前面层次的图像不致于叠加在后面层次上, 否则将降低再现像的对比度。但是当二维图像是由线纹或网纹构成时, 透过前层的线纹或网纹来观看后层的景物, 反

而可以获得独特的视觉效果。目前,国外全息工作者已采用计算机来绘制原图,本文则是采用放大绘图,然后按比例精缩的方法。

四、视角的扩展

再现像的视角是表征显示用全息图质量的一个重要指标。在本文实验中,采用了一些独特的方法,来扩展再现像的视角。

增大水平视角的有效措施是增大条形全息图元的长度,这就要求改善二维目标透明片的照明条件,使得物体光波能均匀地散射在整个条形全息图元面积上。单靠增大二维透明片前面散射屏的粗糙度是不行的,毛玻璃粗糙度的增大势必损失再现像的分辨率。为此,实验时,在毛玻璃的前面放置了一块定向散斑屏。这个屏是通过一个条形毛玻璃屏产生的散斑对底片曝光,而后经显影、定影、漂白制成,它具有很好的单向散射特性^[11]。这样记录的条形全息图,在整个 240 长度范围内具有基本相同的衍射效率。对于上面给出的例子,水平视角可达 44° 。

为了增大垂直视角,实验采用了色序双循环或多循环技术。即在记录横向面积分割全息图时,把每一个二维物体记录在相距一定间隔的两个或多个条形全息图上。当用白光再现最后的二维/三维全息图时,观察窗的颜色将经历两次或多次色序循环,使得垂直方向的视角成倍地增大。按上节给出的记录参数,用色序双循环技术制作了一个二维/三维全息图。在主全息图中,每一层次图像记录在两个宽度为 6mm,间隔 60mm 的条形全息图上(图 11),理论计算垂直方向的视角达 30° 。观察结果与理论计算值相符。如果采用色序三循环,预期垂直视角可达 45° 。值得注意的是,如果用色序循环技术制作单色彩虹全息图,将不难得到 90° 左右的垂直视角。

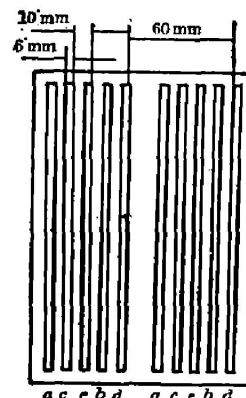


Fig. 11 Schematic representation of the double colour circulation technique

五、结 论

本文介绍的横向面积分割法具有一些独特的优点。由于主全息图的横向面积分割,避免了对底片的重复曝光,有利于提高光能利用率,衍射效率和信噪比。当主全息图制成之后,一次曝光就可以形成二维/三维白光再现全息图,避免了对准的困难。这些特点很适合用于制造大面积、大景深、多层次的彩色二维/三维全息图。特别是,当用光致抗蚀剂之类低感度材料记录时,优点更明显。

由于色散效应,用横向面积分割法制作的二维/三维全息图,其再现像具有假彩色特征,这对于那些要求单色显示的应用来说,无疑是一个缺点。但通过减小条形全息图元的间隔,或者使相邻条形全息图元部分重叠,可使颜色缓慢渐变,就能将这一影响控制在最小范围之内。

参 考 文 献

- [1] 石原聰, 小寺時男; «計測と制御», 1981, **20**, No. 9 (9月), 888~892。
- [2] 小寺時男; «光学技術コンタクト», 1983, **21**, No. 11 (11月), 21~28。
- [3] 小寺時男, 谷口幸男; *Optronics*, 1984, No. 11 (特集: レーザホログラフイの現状と課題), 72~77。
- [4] 武内敏; «画像技術情報», (特集: システムデバイスと材料), 1986, No. 4 (4月), 62~70。
- [5] 謝敬輝, 赵业玲, 于美文; «光学技术», 1986, No. 5 (Nov), 2~4。
- [6] Dorothy James; *Holosphere*, 1984, **12**, No. 7 (Spr), 10~12。
- [7] Masane Suzuki, Motonori Kanaya, Takayuki Saito; *SPIE Proc*, «Application of Holography», 1985, **523**, 38~41。
- [8] Stephen. A. Benton, Herbert. S. Mingace, Jr. William. R. Walter; *SPIE Proc*, «Optics and Photonics Applied to 3D Imagery», 1979, **212**, 2~7。
- [9] 于美文等; «光学全息及信息处理», (国防工业出版社, 1984), 160~162。
- [10] T. S. Yu; «Optical Information Processing», (Copyright ©1983, by John Wiley & Sons Inc), 477~483。
- [11] 于美文; «光学学报», 1986, **6**, No. 3 (Mar), 207~211。

Traversing area partition technique and its application in 2D/3D embossing holograms

XIE JINGHUI, ZHAO YELING AND YU MEIWEI

(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Technology)

(Received 13 January 1987; revised 2 March 1987)

Abstract

A new technique for manufacturing 2D/3D embossing holograms, the traversing area partition method, is presented. The basic principle, designing considerations and calculating formulae of the technique are described. In addition, we propose a method using double colour circulation or multiple colour circulation to increase the vertical viewing angle and the striped-speckle screen to increase the horizontal viewing angle. We have used this technique to make a lot of new 2D/3D embossing holograms successfully. Some of the results are shown in this paper.

Key words: rainbow hologram, embossing hologram.