

应用纵向分区彩虹全息术合成断层图像 的三维消色像*

翟宏琛¹ 王明伟¹ 潘 栋¹ 杨保和² 母国光¹

¹ 南开大学现代光学研究所, 教育部光电信息技术科学开放实验室 天津 300071;
² 天津理工学院光电信息系 天津 300191

提要 报道了应用纵向分割多狭缝曝光彩虹全息术合成多幅断层图像为三维消色像的方法及其实验结果。通过将主全息图记录狭缝按纵向分割并结合使用循环分割和色散补偿光栅, 实现了在较高的分辨率和较低色模糊的多幅断层像的白光三维消色像的合成, 并提高了再现像的视觉亮度、视场和立体感。

关键词 多次曝光彩虹全息, 立体合成, 纵向面积分割法, 色散补偿, 消色像

1 引 言

应用全息技术可把一系列二维的断层平面图像依照其原来的相对位置记录在光学全息图^[1]上。再现时使用白光照明全息图, 能够同时显示记录的多张断层图片的波前, 使观察者不仅能看到每一断层的信息, 而且还能观察到具有立体空间结构的三维合成图像。

由于合成全息立体像使用的二维层析图数目较多, 因此用白光再现时能否保持信息的完整性是评价再现质量的关键。只有不同景深的多个平面再现像是亮度均匀、分辨率大致相同的消色像, 才能满足医学立体影像的要求。

使用非相干多次曝光法^[2,3], 可在同一记录底片上相同区域依次对每张层析图进行曝光。其优点是制造简单、观察视角大。但缺点是在多次曝光中, 由于非相干叠加导致主全息图衍射效率下降, 并且, 随着记录断层图像数目的增加, 再现像的噪声也会大大增加, 这就限制了允许记录的断层图像的数目。

采用多狭缝多次曝光彩虹全息术, 将记录介质按横向分割记录^[4,5]可克服非相干多次曝光法的缺点, 增加允许记录的层析图的数目。但是此方法存在的问题是不同景深处的再现像存在色彩的差异。由于人眼对各种不同波长的光强主观感觉不同^[6], 容易造成视觉灰度分布的失真, 影响立体感。同时, 还要考虑到对各层白光再现像位置偏离的矫正, 需要在记录时预先调整每张层析图的初始位置, 这在计算和定位方面都将带来麻烦^[7,8]。

本文提出的基于主全息图记录介质按纵向分割的多次曝光彩虹全息术则克服了横向分割

* 国家自然科学基金(No. 69677020)及天津市自然科学基金重点资助项目。

收稿日期: 1999-03-08; 收到修改稿日期: 1999-04-28

方法的上述缺陷, 能使各层再现像呈单色像, 因而视觉亮度比较一致。结合使用色散补偿光栅、循环分割等技术, 扩大了观察视场, 提高了再现像的分辨率及可记录的图像的数目, 实现了较理想的三维消色像的合成。

2 记录主全息图的横向及纵向面积分割法

在将记录介质分割为多个狭缝区的记录多幅断层图片的多次曝光二步彩虹全息术中, 我们采用了沿纵向分割记录介质的方法记录主全息图, 如图 1 (a) 所示。即 $x-y$ 平面为主全息图 H_1 所在平面, 平行参考光 R_1 与 x 轴垂直, 并与 z 轴存在一夹角 θ 。在记录介质前放置一个可沿 x 方向移动的狭缝 S , 狭缝的短边与 x 轴平行, 层析图物片紧贴毛玻璃漫散射板 D 放置且与记录介质平面平行。用平行光沿 z 方向照射物片形成漫射物波场。这样, 在记录多幅断层图片的过程中, 每换一幅断层图, 狭缝沿 x 方向移动一个狭缝的距离, 可得到一个新的单元主全息图。依此顺序可将多幅断层图片记录在同一主全息图 H_1 的不同狭缝区域的记录介质上。在第二步记录 H_2 的过程中, 采用与原记录参考光共轭的再现平行参考光再现主全息图, 并仍用平行记录参考光将全部狭缝及其内部单元主全息图的衍射光波记录在全息图 H_2 上(见图 2), H_2 位于原物片组的中心图片再现实像面处。因此, H_2 记录的是原物片的像面及近像面全息图。

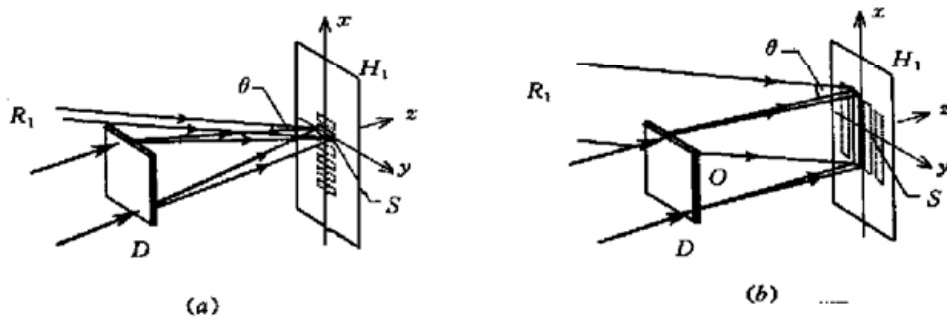


图 1 纵向分区与横向分区记录主全息图示意图

(a) 纵向面积分割法; (b) 横向面积分割方法

Fig. 1 Vertical and horizontal area partition of the elemental master holograms

(a) vertical area partition; (b) horizontal area partition

一般沿横向分割记录介质^[4,5]记录主全息图 H_1 的光路如图 1(b) 所示。较之图 1(a) 不同之处仅在于取狭缝的长边与 x 轴平行, 这相当于将狭缝的方向转了 90° 。每换一张断层图片, 将沿 y 方向移动一个狭缝的距离, 并曝光一次, 则得到一个单元全息图。依此顺序可将多幅断层图片记录在同一主全息图 H_1 的沿横向分布的不同狭缝区域的记录介质上。其第二步记录 H_2 的过程与采用纵向分割方法的相应记录过程一致。

由于在上述两种记录主全息图的光路安排及实验中, 取按横向分割的主全息图上的狭缝宽度及按纵向分割的主全息图上的狭缝长度均远小于物片距主全息图的距离, 因此可认为物光场的基频和零频部分相似, 主要是沿 z 轴方向传播至主全息图。其狭缝区低频干涉条纹的空间基本取向均近似沿 x 方向。所以使用这两种分割方法拍摄的主全

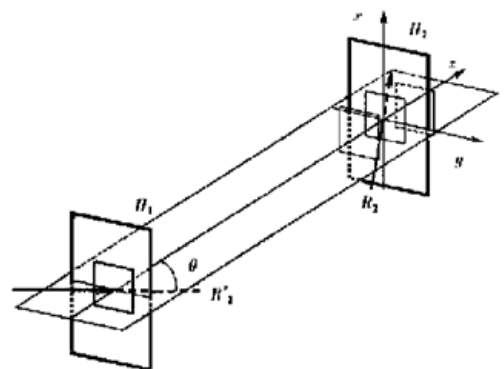


图 2 记录全息图 H_2 的示意图

Fig. 2 Recording of the hologram H_2

图。因此, H_2 记录的是原物片的像面及近像面全息图。

息图上狭缝区的干涉条纹的基频取向主要取决于参考光与物波场的平均夹角 θ 。根据同样的分析,在将主全息图 H_1 再现并记录在全息图 H_2 上的过程中,全息图 H_2 上的干涉条纹的基频取向亦主要取决于记录平行参考光与再现物波场的平均夹角。因此,最后用白光再现应用横向及纵向分割方法的彩虹全息图 H_2 时,狭缝组的实像及相应的原断层图片组的虚像及实像均沿 y 方向色散,呈彩虹分布。

观察用白光再现的应用横向分割方法的彩虹全息图时,由于色散方向与狭缝排列顺序的方向一致,则在某一特定位置观察全息图时,将会通过不同颜色的狭缝实像看到对应的不同景深处物体的再现像以与狭缝像相同的颜色出现,即再现的合成三维图像的不同层次呈彩虹分布。此外,在应用横向分割方法再现的彩虹全息图中由于狭缝的取向与双眼的连线方向垂直,因而双眼会通过不同的狭缝像看到不同断层图片的再现像,即会产生不匹配的体视对,形成错误的三维信息。而观察纵向分割的彩虹全息图时,由于其色散方向与狭缝排列顺序的方向基本垂直,因而观察者可以在某相同视角观察到同一色散角度的相同颜色的不同断层图像的准单色再现像。由于人眼对不同波长光的视觉明度的差异^[6],使用纵向狭缝分割法合成的三维立体全息图较之使用横向法合成的全息图能够更真实、准确地再现原三维物体的不同景深的断层面的相对灰度分布。而且,由于狭缝的取向与双眼的连线方向一致,所以能确保双眼同时观察到同一张断层图片的再现像,防止了横向分割法中体视对不匹配现象的产生。

除此之外,为了使应用横向分割方法记录的全息图各层再现像的视觉亮度基本均匀、一致及补偿再现时出现的 x 方向上的尺度畸变,还需预先进行繁琐的计算及在记录过程中预先微调原层析图片排列的相对位置^[7,8],这些都增加了实验的难度。而使用纵向分割方法合成的立体再现图像不存在 x 方向的尺度畸变,因而在拍摄全息图 H_1 时,也不需要调节断层图片的横向(y 方向)初始位置,这为实验带来了很大的方便。

3 应用纵向分割法的再现像分辨率

一般再现像的分辨率是由衍射受限引起的弥散和色模糊共同决定的,其中衍射受限主要是由比狭缝长度 w 小得多的狭缝宽度 d 引起的。按本方法的实验安排,最小可分辨距离可近似地表示为^[9]

$$E_i \approx [\lambda_i(Z_0 - Z_{oi})/d]$$

式中, Z_0 为主全息图 H_1 与彩虹像全息图 H_2 之间的距离, Z_{oi} 为第二次纪录时第 i 个层析图再现像与 H_2 的距离, λ_i 为再现光波的波长, d 为纵向分割方法中狭缝的宽度。按一般记录条件,若取 $\lambda_i = 550 \text{ nm}$, $Z_0 = 500 \text{ mm}$, $Z_{oi} = \pm 30 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$ 时,可得 $E_i = 0.1 \text{ mm}$ 。可见,只要狭缝宽 d 不小于 3 mm ,再现像的分辨率即可达到 0.1 mm 的人眼分辨率极限。该数值一般远小于被记录的层析图片的最小线分辨距离。所以,按上述条件得到的再现像的分辨率是能充分满足实际需要的。故狭缝宽度 d 引起的弥散可以被忽略,不必再考虑其对再现像最终分辨率的影响。而狭缝长度 w 产生的色模糊造成的最小可分辨距离可表示为^[9]

$$\Delta I_\lambda \approx Z_{oi} \frac{w}{Z_0}$$

此式表明,若欲再现像有较高的分辨率则应在使用纵向分割法记录主全息图时采用较短的狭缝长度。

4 实验及其结果

在本实验中, 将主全息图的记录区按纵向分割, 并结合循环分割^[4]记录方法, 将全部主全息图记录在 210 mm 长, 30 mm 宽的记录区域内, 并将主全息图根据不同的实验分为 7~ 14 个循环区, 每区内有 5~ 10 个狭缝, 狭缝长度 $w = 30$ mm, 宽度 $d = 3$ mm。每个狭缝内的记录介质最多可重复记录 4~ 5 张物片, 每张断层片分别重复记录在不同循环区内的与层析图原顺序相应的狭缝内。这样, 能通过重复记录的手段增加总记录面积和总曝光量。尽管采用纵向面积分割法能够使每一幅断层图像形成色彩相同的再现像, 但若在实验中狭缝长度取值较大, 在每一断层图像的再现像的不同局部仍会有不同的色彩分布。由于本实验中记录的为像面全息或近像面全息, 故这种局部分布并不十分明显。为了消除这种由于狭缝长度造成的色模糊, 可用减小狭缝长度的方法, 但这会使再现像的亮度受到损失。为此采用了较大的狭缝长度 $w = 30$ mm, 并用色散补偿光栅^[10, 11]法对横向色模糊进行了进一步的补偿, 避免了在第二次记录时其实像面距离 H_2 较远的层析图再现时的色模糊。按上述条件, 一般至少可在一主全息图上同时记录 20~ 50 张二维物片。

我们按上述方法采用天津一型干板分别拍摄了 15 张人脑纵切面核磁共振(MR)片和 19 张膝关节纵切面 MR 片的彩虹全息图。白光三维再现消色像分别示于图 3 和图 4。以上各步均使用 Ar^+ 激光器发出的 $\lambda = 514.5$ nm 波长的激光作为光源。两次记录的参考光与主全息图 H_1 及像全息图 H_2 法线的夹角均取 45° , 主全息图与物片的距离即主全息图 H_1 与像全息图 H_2 之间的距离均取 $Z_0 = 500$ mm。与使用横向分割方法相比, 除实现了消色像再现外, 还增加了再现像的亮度和垂直视角^[4]并且避免了双眼体视对的不匹配。此外, 在实验中还使用天津一型干板拍摄了色散补偿光栅来补偿由狭缝长度引起的横向色模糊, 从而使再现像的灰度分布、立体感、亮度和分辨率都达到了医学诊断的基本要求。

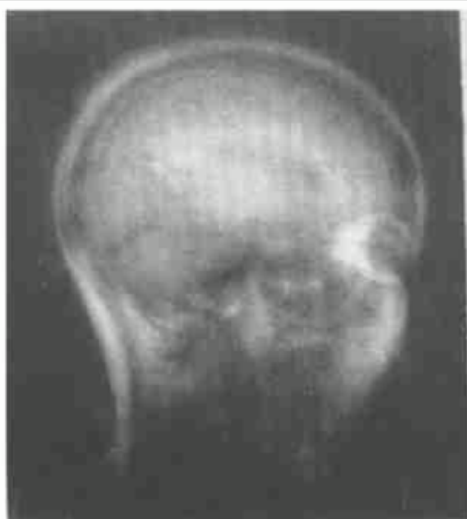


图 3 用 15 张人脑 MR 图片合成的三维全息消色再现像

Fig. 3 Reconstructed 3-D achromatic image of human brain with 15 pieces of MRs



图 4 用 19 张人膝关节 MR 图片合成的三维全息消色再现像

Fig. 4 Reconstructed 3-D achromatic image of human knee-joint with 19 pieces of MRs

参 考 文 献

- 1 H. J. Caulfield ed., Handbook of Optical Holography. New York: Academic Press, 1988
- 2 K. M. Johnson, L. Hesselink, J. W. Goodman. Multiple exposure holographic display of CT medical data. *SPIE*, 1982, **367**: 149~ 154

- 3 M. Suzuki, M. Kanaya, T. Saito. 3-dimensional illustration by multiply exposed hologram. *SPIE*, 1985, **523**: 38~ 41
- 4 Xie Jinghui, Zhao Yeling, Yu Meiwen. Traversing area partition technique and its application in 2D/3D embossing holograms. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, **8**(5): 410~ 416 (in Chinese)
- 5 J. Tsujiuchi. Medical applications of holographic 3-D display. *International Trends in Optics*, J. W. Goodman ed., Academic Press Inc., 1991. 297~ 305
- 6 Jing Qicheng, Jiao Shulan, Yu Bolin *et al.*. Chromatics. Beijing: Science Press, 1979 (in Chinese)
- 7 S. G. Guo, H. C. Zhai, Y. L. Zhan *et al.*. The distortion and its compensation of the reconstructed images in multiple-exposure rainbow hologram. Proc. ICO Topical Meeting, *Optics for Information Infrastructure*, Guoguang Mu ed., JOEL, 1998, 9 Supp.: 214~ 217
- 8 K. Okada, T. Ose. Holographic three-dimensional display of X-ray tomogram. *SPIE*, 1986, **673**: 84~ 88
- 9 Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Applications*. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 1996 (in Chinese)
- 10 D. J. De Bitetto. White light viewing of surface holograms by simple dispersion compensation. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(8): 417~ 418
- 11 C. B. Burckhardt. Display of holograms in white light. *Bell Systems Technical Journal*, 1966, **45**(4): 1841~ 1850

Vertical Area Partition of Recording in the Multiple-exposure Rainbow Hologram for 3-D Achromatic Synthesis of Tomographic Patterns

Zhai Hongchen¹ Wang Mingwei¹ Pang Dong¹ Yang Baohe² Mu Guoguang¹

¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Lab of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071*

²*Department of Optoelectronics, Tianjin Institute of Technology, Tianjin 300191*

Abstract A novel method and the experimental result of the vertical area partition for recording the elemental master holograms in a multiple-exposure rainbow holography are reported. By using this vertical area partition of the recording material to record the elemental master holograms in cycle, 3-D achromatic synthesis of a set of 2-D patterns can be reconstructed. Combined with a plane diffraction grating to compensate the horizontal dispersion during the reconstruction, a bright 3-D synthesized achromatic images with a wider vertical viewing angle, higher resolution, and lower color blur have been obtained in white light reconstruction.

Key words multiple-exposure rainbow hologram, 3-D synthesis, vertical area partition, achromatic image, dispersion compensation