

真彩色体视全息图

王 丁 袁 霞 黄继阳

(重庆大学数理学院, 重庆 400044)

摘 要 用三色光栅照相机拍摄景物的两张视差照片, 然后用单色激光器经二次曝光全息记录制成一张真彩色体视全息图, 在普通白炽灯照明下可再现真彩色体视全息像. 该方法制作过程更简单, 减少了散斑噪音, 消除了彩色全息像的色差, 得到的全息像清晰明亮, 色彩真实, 立体感强.

关键词 真彩色全息图; 体视全息图; 三色光栅

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

两眼对同一物体得到的二幅不相似像引起人对物体产生的深度感叫做双眼视差深度感, 人们很早就利用此视差深度感原理做成各种景物体视镜、立体图片和立体电影. 在全息显示技术中, 双目体视全息图是人们关注的研究对象之一.

目前制作真彩色体视全息图有两种可能的方法. 一种方法是用三色激光器把两张不同视差的彩色透明片通过曝光记录在同一张全息片上. 这种方法需要的激光器价格昂贵, 且要求用全色全息干板, 一般实验室不具备制作条件^[1,2]. 另一种方法采用单色激光器多次曝光全息记录, 一般需曝光 7 次, 并在记录过程中要先后采用两种不同的光路^[3,4]. 然而, 这两种方法得到的体视全息像都要受到激光相干噪音较严重的影响. 本文提出一种用单色激光制作真彩色体视全息图的新方法, 两次曝光记录一张真彩色体视全息图, 操作简单可靠, 极大地减少了多次曝光产生的相干噪音, 也消除了多次曝光合成彩色像产生的色差问题. 得到的真彩色立体像清晰明亮, 色彩真实, 立体感强.

1 工作原理

用配有三色光栅的照相机从两个不同角度拍摄, 把景物的视差图像的彩色信息编码记录在两张黑白胶片上. 体视像就是把照相机拍摄的两张视差照片上的像分别送到人的左右眼, 让这两张照片在人视网膜上的像与人眼直接看景物得到的感觉相同, 产生出景物照片的深度立体感. 因此用相机拍摄两视差照片的角度应该与人两眼观察景物中心点的夹角相同, 在景物较近时就应如此. 在景物较远时, 由于深度信息获取受相机焦深的限制, 可适当增加相机拍摄角度来增大视差效果.

图 1 是全息记录光路. 从 He-Ne 激光器 L 发出的光束经分束器 K 分为 1, 2 两束. 光束 1 是带有景物三基色信息的物光, 光束 2 是散射参考光, 经过一个光束成形和扫描系统后成为一束长 5 cm 宽 1 cm 的矩形光斑投射到毛玻璃 G 上, G 后面放置一条宽为 9 mm 的长狭缝. 透过狭缝的散射光射到全息片 H 上作为参考光. 在全息记录中, 先把光束射到狭缝上半部产生一束参考光与其中一张视差片产生的物光相干涉, 全息记录一次. 然后把光束扫描到狭缝下半部产生一束参考光, 与另一张视差照片的物光相干涉, 再全息记录一次. 把经过两次曝光记录的全息片处理后就得到一张真彩色体视全息图.

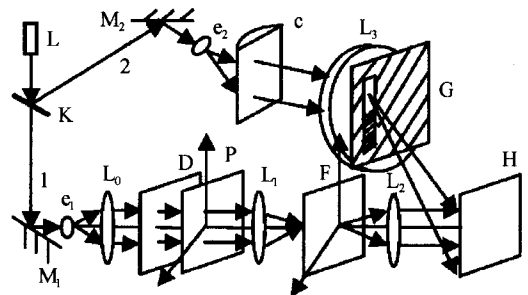


图 1 真彩色体视全息图记录光路
Fig. 1 The arrangement of true color holographic stereogram recording

三色光栅照相机拍摄的景物像通过不同空频的光栅调制记录了红绿蓝三基色信息 T_R , T_G 和 T_B ^[5,6]. 调制光栅一般为朗奇光栅, 但为了描述简单, 本文假设调制光栅为正弦光栅. 于是视差照片 P 的振幅透射率可写成

$$T = T_R(x, y) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_{R_x}x + f_{R_y}y)] \right\} + T_G(x, y) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_{G_x}x + f_{G_y}y)] \right\} + T_B(x, y) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_{B_x}x + f_{B_y}y)] \right\} \quad (1)$$

式中 (f_{R_x}, f_{R_y}) , (f_{G_x}, f_{G_y}) , (f_{B_x}, f_{B_y}) , 分别是红、绿、蓝三色光栅在 x 和 y 方向的空频.

光束 1 通过衍射光学元件 D 后出现三束等光

强平行光,在 P 前表面的光场可表示为

$$\tilde{E}_D = 1 + \exp [i2\pi f_{1x}x] + \exp [i2\pi f_{2x}x] \quad (2)$$

这表明这三束平行光在 P 平面上的空频分别为(0, 0)($f_{1x}, 0$)和($f_{2x}, 0$). 于是在 P 平面后表面处的光场分布为

$$\tilde{E}_P = T(x, y) + T(x, y)\exp [i2\pi f_{1x}x] + T(x, y)\exp [i2\pi f_{2x}x] \quad (3)$$

在透镜 L_1 后焦平面 F 上的光场分布为

$$\tilde{E}_{F1} = FT(\tilde{E}_P) = \tilde{T}\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) + \tilde{T}\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) * \delta\left(\frac{\xi}{\lambda f} - f_{1x}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) + \tilde{T}\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) * \delta\left(\frac{\xi}{\lambda f} - f_{2x}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \quad (4)$$

式中 * 表示卷积, (ξ, η) 是与 (x, y) 平行、原点在 z 轴上的坐标, $\tilde{T}(f_x, f_y) = FT\{T(x, y)\}$, FT 表示傅里叶变换.

在 F 平面上放有三针孔滤波屏,让光场中的三项通过. 于是在滤波屏后的光场表示为

$$\tilde{E}_F = \tilde{T}_R\left(\frac{\xi}{\lambda f} - f_{Rx} - f_{1x}, \frac{\eta}{\lambda f} - f_{Ry}\right) + \tilde{T}_G\left(\frac{\xi}{\lambda f} - f_{Gx}, \frac{\eta}{\lambda f} - f_{Gy}\right) + \tilde{T}_B\left(\frac{\xi}{\lambda f} - f_{Bx} - f_{2x}, \frac{\eta}{\lambda f} - f_{By}\right) \quad (5)$$

式中有 $\tilde{T}_R(f_x, f_y) = FT\{T_R(x, y)\}$ 等.

以上光场经过透镜 L_2 后到达其后焦平面 H 上的光场表示为

$$\tilde{O} = FT\{\tilde{E}_F\} = T_R(x, y)\exp \{i2\pi[(f_{Rx} + f_{1x})x + f_{Ry}y]\} + T_G(x, y)\exp \{i2\pi[f_{Gx}x + f_{Gy}y]\} + T_B(x, y)\exp \{i2\pi[(f_{Bx} + f_{2x})x + f_{By}y]\} \quad (6)$$

这里忽略了坐标反转. 式(6)右边三项可看成是三列空频分别为 $(f_{Rx} + f_{1x}, f_{Ry}), (f_{Gx}, f_{Gy}), (f_{Bx} + f_{2x}, f_{By})$ 的平面波在 H 平面上的表达式,其振幅分别是 $T_R(x, y), T_G(x, y), T_B(x, y)$. 这就是全息记录中的物光表达式.

全息记录中的参考光是从图 1 中的半狭缝发出的漫射光,可把它们看成是一些无确定位相关关系的点光源集合发出的光束. 如图 2 建立一直角坐标系,其原点和 x, y 轴都在全息片 H 内. 设参考光中

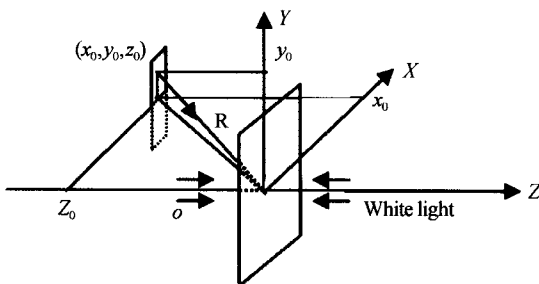


图 2 全息记录和再现光束的关系
Fig. 2 The relation of holographic recording and reconstruction light

一点光源位置为 (x_0, y_0, z_0) , 发出的光场在全息片上分布为

$$\tilde{R} = \tilde{R}_0 \exp \left[-i \frac{2\pi(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0} \right] \quad (7)$$

式中 $\tilde{R}_0 = \frac{E_0}{|z_0|} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} z_0)$

物光和参考光在全息片上叠加的光强分布为 $|\tilde{O} + \tilde{R}|^2$, 全息片一次曝光处理后的透射率为

$$t = \beta_0 + \beta_1 |\tilde{O} + \tilde{R}|^2 = \beta_0 + \beta_1 [|\tilde{O}|^2 + |\tilde{R}|^2 + \tilde{O}\tilde{R}^* + \tilde{O}^*\tilde{R}] \quad (8)$$

式中 β_0, β_1 是常量. 把处理后的全息片放回原位, 用平行白光束从全息片乳胶面背面垂直照明, 可在半狭缝位置看到真彩色全息像. 对于这里曝光两次记录两张视差图像的情况, 人的左右眼可分别在两个半狭缝处看到相应的视差真彩色全息像, 即得到一个真彩色体视像.

下面介绍再现像为真彩色像的条件. 全息片透射率式(8)右边括号内第三项是与真彩色像有关的项, 其展开详细表达式为

$$t' = \beta_1 \tilde{O}\tilde{R}^* = T_R \exp \{i2\pi[(f_{Rx} + f_{1x})x + f_{Ry}y]\} \cdot \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_R} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0} \right] + T_G \exp \{i2\pi[f_{Gx}x + f_{Gy}y]\} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_R} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0} \right] + T_B \exp \{i2\pi[(f_{Bx} + f_{2x})x + f_{By}y]\} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda_R} \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0} \right] \quad (9)$$

式中忽略了一个共同的因子, λ_R 为记录光波长. 用白光照明产生真彩色全息像的条件是照明光中的红光成分乘以式(9)右边第一项产生的会聚光的位置, 照明光中的绿光成分乘以式(9)右边第二项产生的会聚光的位置和照明光中的蓝光成分乘以式(9)右边第三项产生的会聚光的位置都在同一半狭缝内, 参考光实际上是半狭缝中许多点产生的, 所以在半狭缝处可看见一真彩色全息像. 可以把这三种颜色信息的光波叫作再现出的有效红光, 有效绿光, 有效蓝光.

于是有效红光再现波面在全息片上的表达式为

$$\tilde{E}_R = T_R \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda_R} \frac{[x - (x_0 - x_R)]^2 + [y - (y_0 - y_R)]^2}{2z_0} \right\} \quad (10)$$

式中

$$x_R = z_0 \lambda_R (f_{Rx} + f_{1x}), y_R = z_0 \lambda_R f_{Ry} \quad (11)$$

这里略去了一个与讨论无关的位相因子. 式(10)表

明带有 T_R 信息的红光是一球面波, 会聚在 $x=x_0-x_R, y=y_0-y_R, z=z_0$ 处, 其中 λ_R 是红光波长.

有效再现绿光在全息片处的光场表达式为

$$\tilde{E}_G = T_G \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda_G} \cdot \frac{[x-(x_0-x_G)]^2 + [y-(y_0-y_G)]^2}{2z_0 \frac{\lambda_R}{\lambda_G}} \right\} \quad (12)$$

式中

$$x_G = \lambda_R z_0 f_{Gx}, y_G = \lambda_R z_0 f_{Gy} \quad (13)$$

式(12)表明带有 T_G 信息的绿光是会聚在 $x=x_0-x_G, y=y_0-y_G, z=\frac{\lambda_R}{\lambda_G} z_0$ 处的球面波, 其中 λ_G 是绿光波长.

有效再现蓝光在全息片处的光场表达式为

$$\tilde{E}_B = T_B \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda_B} \cdot \frac{[x-(x_0-x_B)]^2 + [y-(y_0-y_B)]^2}{2z_0 \frac{\lambda_R}{\lambda_B}} \right\} \quad (14)$$

式中

$$x_B = z_0 \lambda_R (f_{Bx} + f_{2x}), y_B = z_0 \lambda_R f_{By} \quad (15)$$

式(14)表明带有 T_B 信息的蓝光是会聚在 $x=x_0-x_B, y=y_0-y_B, z=\frac{\lambda_R}{\lambda_B} z_0$ 处的球面波, 其中 λ_B 是蓝光波长.

注意: 图2中在 z 为常量的平面内, x 坐标表示观察彩色全息图各单色像的水平狭缝的垂直位置, y 坐标表示在一水平狭缝中各观察点的位置. 由于狭缝长的方向即 y 方向尺寸较长, 而 f_{Ry}, f_{Gy}, f_{By} 又很小, 所以对再现光束 y 方向的分布要求并不严格. 主要是要求狭缝宽方向即 x 方向三种颜色光的狭缝要重合, 才能产生彩色像. 由式(11), (13)和(15)可求得

$$\begin{aligned} f_{1x} &= \left(1 - \frac{\lambda_G}{\lambda_R}\right) \frac{x_0}{\lambda_R z_0} - f_{Rx} + \frac{\lambda_G}{\lambda_R} f_{Gx} \\ f_{2x} &= -\left(\frac{\lambda_G}{\lambda_B} - 1\right) \frac{x_0}{\lambda_R z_0} - f_{Bx} + \frac{\lambda_G}{\lambda_B} f_{Gx} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)表示的条件可由衍射光学元件 D 的设计制作得到满足. 例如, 可取 $\lambda_R = 633 \text{ nm}, \lambda_G = 540 \text{ nm}, \lambda_B = 470 \text{ nm}, z_0 = 300 \text{ mm}, x_0 = z_0 \tan 35^\circ = 210 \text{ mm}, f_{Rx} = 20 \text{ mm}^{-1}, f_{Gx} = 0, f_{Bx} = -20 \text{ mm}^{-1}$, 可求得 $f_{1x} = 142.47 \text{ mm}^{-1}, f_{2x} = -144.70 \text{ mm}^{-1}$. 因此用一个空频为 143 mm^{-1} 左右的位相型正弦光栅作为衍射光学元件 D 就可满足式(16)的条件.

2 实验工作

本文提出的方法已在实验中得到完全验证. 实

验中所用的三色光栅及制作方法已在参考文献[6]中作了介绍. 景物视差照片的拍摄角度由人两眼对景物中心的张角确定, 对于 60 cm 处的一盆花, 两次拍摄角度差按计算为 6° , 实验中取了 $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ 几种角度进行比较. 结果表明, 6° 效果最好, 其余的角度也能看到体视像, 但 2° 体视效果明显较差, 10° 体视像观察起来眼睛很疲劳. 对于正确的视差片制得的真彩色体视全息图立体效果十分明显, 与平面单次曝光全息图比较, 两次曝光的再现像明显凸现于全息片外. 如果在全息记录时把上下半狭缝对应的两视差片交换一下可得到赝体视像, 即本应该凸现的部分却凹进去了.

实验中要注意的问题是, 在全息记录中应使狭缝边沿部分的散射参考光有足够的光强照射到全息片上, 并且要注意物光和参考光的光程差应尽量小, 保证再现到狭缝边缘部分的光比较强. 这了实现这一点, 实验中的参考光光路采用了扫描光路, 保证狭缝各部分的散射光到全息片的光程基本相同, 有效地提高了体视像的体视效果.

像的真彩色效果和清晰度也是十分重要的指标. 由于本方法采用的是散射参考光记录全息图, 极大地减少了激光散斑对全息像的影响^[7], 与记录 6 张菲涅尔全息图加上 1 张合成全息图的方法相比, 信噪比得到显著提高, 也消除了由多次曝光中的对准问题和再现像记录中光路调节不当产生的色差. 制得的体视真彩色全息图不但色彩鲜艳, 而且在相当程度上保留了像的灰度和空间分布特性, 加强了全息像的立体感.

本方法在提高了成像质量的同时, 操作步骤也减少了很多. 采用三色光栅照相机拍摄视差片就省去了一般方法中分色片制作的工序, 二次曝光法又省去了对多种全息记录光路的调整, 简单的操作也有利于全息像质量的提高. 实验制作的多张体视真彩色全息图都具有清晰明亮, 色彩鲜艳, 立体感强的特点, 达到了以前从未做出的水平.

3 结论

本文提出的用单色激光器制作真彩色体视全息图是一种非常可行的全息显示方法, 它具有如下显著特点:

- 1) 采用三色光栅编码记录视差照片, 减少了制作分色片的步骤.
- 2) 采用散射参考光全息记录方法, 减少了全息图的相干噪音, 使全息像更清晰.
- 3) 简化了真彩色体视全息图全息记录和光路安排的次数, 只分别对两张视差片曝光记录一次, 消

除了色差。

4) 制得的全息图再现像清晰明亮,无色差且色彩鲜艳,立体感强。

参考文献

- 1 吕晓旭,钟丽云,余灿麟,等. 透射型彩色全息图的拍摄与再现. 光子学报,2002,**31**(4):463~466
Lu X X, Zhong L Y, She C L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,**31**(4):463~466
- 2 忽满利,许忠瑛,陈晓颖,等. 利用国产全色银盐干版制作真彩色反射全息图. 光子学报,2001,**30**(12):1516~1519
Hu M L, Xu Z Y, Chen X Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001,**30**(12):1516~1519
- 3 许澍翔,刘海峰,李维宁,等. 体视彩虹彩色全息图的研究与应用. 激光杂志,1999,**20**(3):27~29
Xu S Y, Liu H F, Li W N, et al. *Laser Journal*, 1999,**20**(3):27~29
- 4 郭怀梅,刘守,张向苏. 双体视对真彩色彩虹全息图. 激光杂志,2000,**21**(2):49~50
Guo H M, Liu S, Zhang X S. *Laser Journal*, 2000,**21**(2):49~50
- 5 母国光. 白光光学信息处理及其彩色摄影术. 现代光学与光子学进展. 天津:天津科学技术出版社,第一版,2003,**2**:119~132
Mu G G. *Development on Modern Optics and Photonics*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2003,**2**:119~132
- 6 王丁,曾毅. 三色光栅制作真彩色全息图. 激光杂志,2004,**25**(3):48~51
Wang D, Zeng Y. *Laser Journal*, 2004,**25**(3):48~51
- 7 王丁,李劲松. 散射参光法制作真彩色全息图. 激光杂志,2003,**24**(1):45~47
Wang D, Li J S. *Laser Journal*, 2003,**24**(1):45~47

True Color Holographic Stereogram

Wang Ding, Yuan Xia, Huang Jiyang

Mathematics and Physics College of Chongqing University, Chongqing 400044

Received date: 2004-12-20

Abstract Two parallax films of a nature color scene are obtained with a three color grating camera. With the films, a true color holographic stereogram can be made with one-wavelength laser through two exposure recordings. A true color stereoscopic scene image can be reconstructed from the hologram as it is illuminated by a white light source. Compared with other methods, this method is simpler in operation. It decreases the scattering noise and gets rid of chromatic aberration of the reconstructed image. It can produce a clearer and brighter achromatic aberration stereoscopic color image.

Keywords True color hologram; Stereoscopic hologram; Three color grating



Wang Ding was born in 1944, in Chongqing. He took his M. S. degree in modern physics from Chinese Academy of Sciences in 1982. Now, he is a professor in Mathematics and Physics College of Chongqing University. His main research fields include optical holography and information processing.