

单波长编码计算机制彩色彩虹全息图的研究*

蔡晓鸥¹ 王 辉² 李 勇²

(1 温州大学(筹)物理与电子信息学院,温州 325003)

(2 浙江师范大学信息光学研究所,金华 321004)

摘 要 提出计算机制三维物体彩色全息图的新方法. 通过理论分析表明,在满足一定的条件下,三个不同原色的点光源所产生的全息图光栅结构和距全息图不同距离的三个同色物点的光产生的全息图光栅结构是等价的. 根据这一原理并参照彩虹全息技术,研究了物体三原色信息光分布的编码方法和全息图的算法,用单波长计算实现彩色全息图的制作,同时,较为完满地解决了全息图叠加和色串扰问题. 实验结果证明了该方法的可行性及有效性.

关键词 计算机制彩色全息图;彩虹全息图;单波长彩色编码

中图分类号 TB877 **文献标识码** A

0 引言

光学彩色全息技术已逐渐成熟,许多技术已经广泛直接应用于全息商品之中. 最有代表性的技术有二维图像彩色全息技术^[1],单波长三维物体彩色彩虹全息技术^[2],彩色反射全息技术^[3]. 作为一种彩色信息传递技术,都不可避免地要获得物体的三原色信息. 光学彩色全息图因为要对物体三原色信息进行全部的记录,因而技术显得非常的复杂,而且对设备和环境的要求也相当的高,使得彩色全息技术难以普及. 计算机制全息图以其独特的灵活性和低成本一直受到人们的关注. 但是,由于全息图的信息量非常大,过去的一般计算机速度难以计算出实用的显示全息图. 随着计算机速度的大幅度增大以及高分辨率的图像输出设备的发展,计算机制全息图的研究已经进入了实用阶段^[4~7]. 然而,计算机制彩色全息图由于涉及到三色信息编码、全息图叠加以及色串扰问题,虽然有一些进展^[8],但尚不实用. 文献^[8]在计算全息图时,对三分色物体采用三原色波长进行计算,同时在全息图上,三分色物体的全息图采用分区编码的方式,这样极大地增加了全息图的计算量. 根据光学单波长彩色彩虹全息图原理,提出一种物体三原色信息光分布的编码方法,用单波长计算全息图,较为完满地解决了全息图叠加和色串扰问题. 本方法充分利用了计算机制全息图灵活性的优点,将激光彩色全息图中的繁琐的拍摄技术巧妙地通过编程的方法计算实现. 同时,利用自己研制的计算全息输出系统^[9]进行了实验验证,得到了较好的结果.

1 单波长彩色全息图物点的坐标变换

设有一个彩色物点其坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,分解成三个原色物点,在计算其全息图时,将三原色物点的坐标分别设置为 $(x_{0r}, y_{0r}, z_{0r}), (x_{0g}, y_{0g}, z_{0g}), (x_{0b}, y_{0b}, z_{0b})$,或统一表示为 $(x_{0\tau}, y_{0\tau}, z_{0\tau})$,其中 τ 分别表示三原色 r, g, b ,并用单一波长为 λ_r 的光波作为记录光. 按照全息图的物像关系,全息图再现时,像点坐标除了与原物点位置有关以外,还与再现波长有关^[10]. 当用红绿蓝三原色光 $\lambda_r(\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b)$ 再现时,可以再现出九个像点,其中有三个像点是红光再现红原色像点,绿光再现绿原色像点,蓝光再现蓝原色像点,这三个像点对研究有意义,其它六个像点属于串色像,可以采用彩虹全息技术消除. 三个原色像点的坐标分别为

$$\begin{aligned} z_{Cr} &= \frac{z_C z_{0r} z_R}{z_{0r} z_R + \mu_r z_C (z_R - z_{0r})} \\ x_{Cr} &= \frac{x_C z_{0r} z_R + \mu_r z_C (x_{0r} z_R - x_R z_{0r})}{z_{0r} z_R + \mu_r z_C (z_R - z_{0r})} \\ y_{Cr} &= \frac{y_C z_{0r} z_R + \mu_r z_C (y_{0r} z_R - y_R z_{0r})}{z_{0r} z_R + \mu_r z_C (z_R - z_{0r})} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $(x_R, y_R, z_R), (x_C, y_C, z_C)$ 分别为参考光源和再现光源坐标, $\mu_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_r}$,对于不同颜色光,有 $\mu_r = 1, \mu_g = \frac{\lambda_g}{\lambda_r}, \mu_b = \frac{\lambda_b}{\lambda_r}$. 如果这三个原色像点能够重合,这样就完成了一个彩色物点到一个彩色像点的传递. 但是,如果由物点分解出来的三原色点用同一波长记录,并且其坐标点不变,即

$$\begin{aligned} x_{0r} &= x_{0g} = x_{0b} = x_0, y_{0r} = y_{0g} = y_{0b} = y_0, \\ z_{0r} &= z_{0g} = z_{0b} = z_0 \end{aligned}$$

则再现时,由式(1)可以得到结论:三原色再现像点一般不能重合,因而也就不能再现原彩色像点.

*浙江省自然科学基金(102056)资助

Tel:0577-88373109 Email:caixo@wzu.edu.cn

收稿日期:2005-04-25

现在考察一下当参考光和再现光为同一束平行光时的情况, $z_R = z_C = \infty$, 且参考光方向选取和某个坐标方向垂直, 比如和 X 方向垂直, 设 $\frac{y_R}{z_R} = \sin \theta_{yR}$, 式(1)可以简化为

$$\begin{aligned} z_{C\tau} &= \frac{z_{O\tau}}{\mu_\tau} \\ x_{C\tau} &= x_{O\tau} \end{aligned} \tag{2}$$

$$y_{C\tau} = \sin \theta_{yR} z_{O\tau} \left(\frac{1}{\mu_\tau} - 1 \right) + y_{O\tau}$$

显然, 从式(2)可以看出, 为了使再现的三原色像点坐标和原物点坐标重合, 可以令

$$z_{O\tau} = \mu_\tau z_O \tag{3}$$

并且

$$x_{O\tau} = x_O \tag{4}$$

$$y_{O\tau} = y_O + z_O \sin \theta_{yR} (\mu_\tau - 1)$$

将式(3)、(4)代入式(2), 得到

$$\begin{aligned} z_{C\tau} &= z_O \\ x_{C\tau} &= x_O \end{aligned} \tag{5}$$

$$y_{C\tau} = y_O$$

或者

$$\begin{aligned} z_r &= z_O & z_g &= z_O & z_b &= z_O \\ x_r &= x_O & x_g &= x_O & x_b &= x_O \end{aligned} \tag{6}$$

$$y_r = y_O \quad y_g = y_O \quad y_b = y_O$$

即 τ 不论是什么颜色的再现光, 再现像都是重合的.

这里证明了, 一个彩色物点的三原色光产生不同的全息图光栅结构, 在满足一定的条件下, 三原色光所产生的全息图是和距全息图不同距离的三个同色物点的光产生的全息图是等价的. 根据这一原理, 彩色计算机全息图的过程就简化为, 将彩色物体分成三个分色物体, 每个物体的反射率按照三原色分色原理获得, 根据式(3)、(4)给出的坐标变换, 使三个物体与记录平面距离不同, 然后用单一波长计算记录平面上的三个分色物体总的物光分布, 再与参考光相叠加即可得到彩色全息图. 再现时, 三个物体的等价全息图结构将使得红绿蓝三原色像自动重合.

2 单波长计算彩色全息图再现和色串扰的消除

以上方法计算获得的全息图用白光再现时, 由于一个物点已经被分解成三个物点记录, 所以会再现出三组彩虹像, 如图 1.

根据上一节分析的原理, 在这三组彩虹像中, 白光中与分色光对应的三原色光再现的红绿蓝三个像点是重合的. 当点全息图的宽度比较大时, 三组彩虹像点发出的光都有可能进入人眼, 同时产生像模

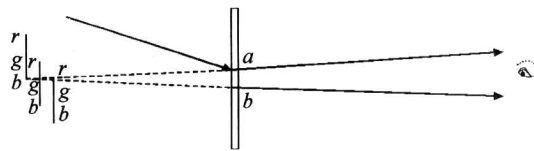


图 1 彩色全息图再现的色串扰

Fig. 1 Color crosstalk in the reconstruction of color hologram

糊和色模糊. 但如果基元(点)全息图的宽度 ab 足够小, 人眼就只能看到三组彩虹像上各一个很小的区域, 当 ab 小到一定程度以后, 看到的区域可以认为就是一个像点. 当人眼在适当位置时可以看到合成的彩色像点, 而三组彩虹像的其它各点的光就不会进入眼睛, 此时就避免了色串扰. 其实这就是彩虹全息原理. 在计算物体全息的时候, 设想物体上每一个物点发出的光都被一个狭缝 Slit 所限制, 如图 2. 这样物体上任一点发出的光就成为片状光束, 而在记录平面上的物光分布区域成为一个条状. 仅仅记录这样区域的点全息图称作“线全息图”^[11]. 计算机制彩色全息图可以模拟这一原理, 仅仅计算线全息图, 这样不仅可以消除色串扰, 而且可以大大减少数据量从而减少计算量.

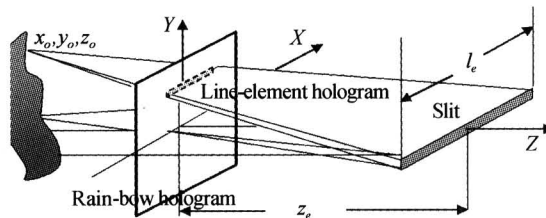


图 2 彩虹全息中物点、狭缝、线全息图及其对应的片状光束之间的关系

Fig. 2 Relationship between object point, slit, line-element hologram and its corresponding light in rainbow hologram

因此, 彩色计算全息的问题可以这样表述: 一个彩色物体和一个狭缝共同构成一个“物体”, 物体和狭缝分别位于全息图的两侧. 计算全息图分布, 使得再现像三原色像能够重合, 即三原色物体重合, 狭缝像也重合. 这样当眼睛位于狭缝位置观察时, 可以看到消除了色串扰的彩色像. 上一节已经研究了物点的坐标变换可以使得三原色像点重合, 而这里将研究与三个原色点对应的狭缝的重合, 进行色串扰的消除. 假设狭缝中心坐标为 $(0, 0, z_e)$, 与三原色点坐标变换类似, 与三原色点对应的三个狭缝坐标位置应该变换分别为

$$y_{S\tau} = z_e \sin \theta_{yR} (\mu_\tau - 1) \tag{7}$$

$$z_{S\tau} = \mu_\tau z_e$$

假设已经按照上述原理计算出了彩色物体的线全息图, 用白光再现. 白光中与三原色光一致的三个波

长的光再现的像点坐标由式(6)表明是重合的,而与之对应的狭缝像位置为

红光(λ_r)再现红狭缝位置

$$z_{Slr} = z_{Sr} = z_e$$

$$y_{Slr} = y_{Sr} = 0$$

绿光(λ_g)再现绿狭缝位置

$$z_{Slg} = \frac{z_{Sg}}{\mu_g} = z_e$$

$$y_{Slg} = \sin \theta_{yR} z_{Sg} \left(\frac{1}{\mu_g} - 1 \right) + y_{Sg} = 0$$

蓝光(λ_b)再现蓝狭缝位置

$$z_{Slb} = \frac{z_{Sb}}{\mu_b} = z_e$$

$$y_{Slb} = \sin \theta_{yR} z_{Sb} \left(\frac{1}{\mu_b} - 1 \right) + y_{Sb} = 0$$

这样,三原色像点和与之对应的狭缝像全部都重合,当人眼在重合的狭缝像处观察时可以看到合成的彩色像点. 根据全息图物像一般式(1),其它颜色的光再现的狭缝像不可能在原狭缝位置成像,而三原色光再现的与原色不对应的狭缝像也不可能成像在原位置,三个原色物体的全息图分别再现三组狭缝彩虹像,三个彩虹狭缝重合的部分正好对应着三原色像的重合,见图 3.

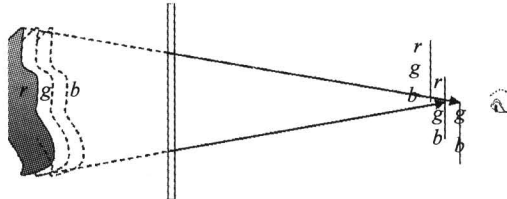


图 3 彩色彩虹全息图再现原理
Fig. 3 Reconstruction principle of color rainbow holograms

3 彩色全息计算原理及其实验结果

本工作是充分利用计算机全息图的灵活性实施彩色全息图制作的,所以实验工作关键在于全息图的算法和编程,根据上述计算彩色全息图原理,程序设计大概流程图见图 4.

在计算中,每一个分色物点对应一个经过坐标变换的狭缝. 物点与狭缝之间的片状光束决定了物点线全息图在整个全息图上的位置和大小,关于线全息图的位置和大小的计算,可以通过分色物点位置式(3)、(4)狭缝的位置式(7)以及图 2 所给出的几何关系进行计算,这里不再赘述.

作为原理实验,通过 3D(Lightwave)软件制作了图6(a)的简单彩色三维模型,模型的大小为 10 mm×10 mm×10 mm,并转化成三维数据,转化后的数据格式如表 1,物体取样数据点数为 5320. 计算使用的波长为 650 nm,全息图的大小为 12 mm×12 mm,

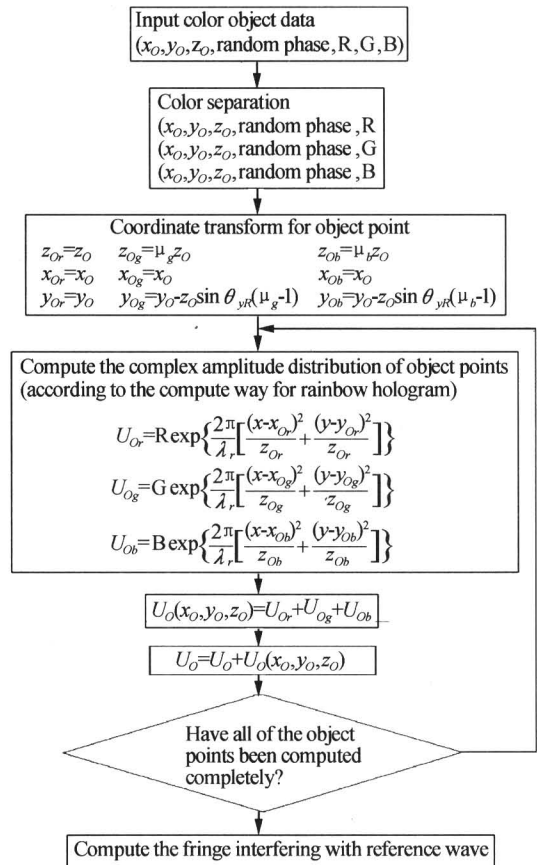


图 4 彩色全息计算流程图
Fig. 4 Flow chart of calculating color holograms



图 5 计算机全息图缩微输出系统
Fig. 5 Output system set of CGH microfiche

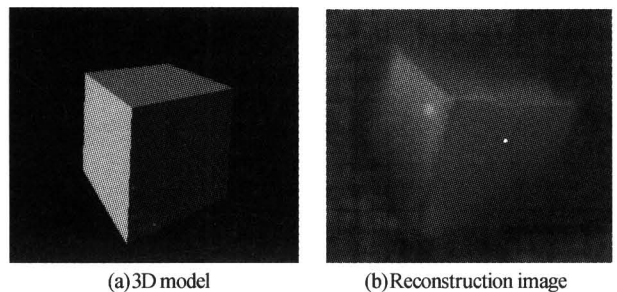


图 6 实验结果
Fig. 6 The experimental result

狭缝的长度 40 mm. 观察距离为 400 mm. 全息图的取样间隔根据干涉条纹频率,按照香农抽样定理,取 1 μ m. 全息图的输出是采用自行研制的

表 1 取样物点坐标与分色相对亮度数据格式

| | x | y | z | 随机相位 | R | G | B |
|---|----------|-----------|-----------|----------|------------|-----------|------------|
| 0 | 1.010446 | -1.544267 | -0.467486 | 1.006291 | 86.162636 | 86.162636 | 255.499512 |
| 1 | 0.977872 | -1.553092 | -0.413015 | 0.859029 | 255.499512 | 61.967735 | 61.967735 |
| 2 | 0.939525 | -1.553092 | -0.413015 | 4.663301 | 255.499512 | 61.967735 | 61.967735 |
| 3 | 1.054568 | -1.514744 | -0.413015 | 3.239767 | 255.499512 | 61.967735 | 61.967735 |
| 4 | 1.004738 | -1.497628 | -0.521342 | 5.522331 | 86.162636 | 86.162636 | 255.499512 |
| 8 | 0.862829 | -1.514744 | -0.413015 | 2.012583 | 86.162636 | 86.162636 | 255.499512 |
| 9 | 0.824481 | -1.514744 | -0.413015 | 3.534292 | 86.162636 | 86.162636 | 255.499512 |
| | | | | | | | |

LCD 图像微缩系统(图 5). 图 6(b)使用数码相机拍摄的再现像,可以看出比较好地恢复了原彩色物体.

实验中,全息图的缩微输出是非常关键的技术.传统的方法是首先利用打印机打印出比较大的全息图,然后利用缩微照相的方法进行微缩以达到全息图要求的细微光栅结构,传统的方法过程复杂,制作周期长.而且由于中间过程多,容易造成全息图结构的信息丢失而影响最后的再现效果.研制了一种数字全息图的输出系统,本系统主要由 LCD 显示屏、精密光学缩微器件、自动曝光装置以及接口控制部件组成.计算获得的数字全息图可以直接输入系统中透射型 LCD 显示屏,通过自动的分幅拼接直接得到缩微的全息图.但是,从图像的再现效果来看,还存在一些问题.主要问题是视角小,彩色恢复有些失真.全息图的视角大,意味着全息图的光栅频率很高,也就意味着,对于同样大小的全息图,视角大的全息图分辨率高,计算数据量大.就本次实验的计算量而言,全息图的点数为 12000×12000 ,使用 P5 计算机,计算时间为 4 个多小时.所以按照目前的计算机的计算速度和内存,更大的视角需要的计算时间会成倍增长,对于实用性很有影响.色彩有一定的失真主要原因是微缩的倍数很难和预设光栅结构一致,这样再现时将产生波长的漂移.下一步的工作是在研究计算机硬件并行处理的基础上,进一步探索彩色全息图的快速算法,同时研究全息信息的冗余性,努力减少全息信息量.另外,研究全息图微缩输出系统的输出准确度,使得最后输出的全息图与预设的全息图结构保持一致性.

4 结论

计算机彩色全息图的研究是随着计算机快速发展而发展起来的,如何充分利用计算机全息图的灵活性,将光学(激光)彩色全息的繁琐的制作技术通过计算机的编程和算法来实现,同时尽量的减少数据量,提高计算速度,是本文主要的研究目的所在.本文通过计算点全息图的光栅结构与物点到全息图的距离和记录波长的等价关系,并参照彩虹全

息技术,研究了物体三原色信息光分布的编码方法和全息图的算法,用单波长计算实现彩色全息图的制作.实验结果证明该方法较为完满地解决了全息图叠加和色串扰问题,同时计算量小,达到了预期的效果.

随着计算机速度的提高和相关技术的进步,计算机全息图在三维显示领域的应用将会有较大的突破.充分研究全息技术的本质,就可以使得计算机全息图的灵活性得到充分的发挥.既可以达到光学全息所难以达到的显示效果,又可以使得全息图制作简捷方便,同时大大降低成本.

参考文献

- 1 蔡雪强.真彩色模压全息图.应用激光,1992,12(4):167~169
Cai X Q. *Applied Laser*, 1992, 12(4):167~169
- 2 Fan C, Guo L R, Jiang C C. Color coding reproduction of 3D object with rainbow holography. *Opt Eng*, 1991, 30(10):1624~1628
- 3 Kubota T. Recording of high quality color holograms. *App Opt*, 1986, 25(22):4141~4145
- 4 刘诚,刘志刚,薄峰,等.数字全息中再现像分离问题的研究.光子学报,2003,32(5):588~591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5):588~591
- 5 Ferri L C. Visualization of 3D information with digital holography using laser printers. *Computer & Graphics*, 2001, 25(2):309~321
- 6 赵雅晶,钟金钢,黄氏傅里叶计算全息图的数字再现及零级像的消除.光子学报,2004,33(11):1239~1242
Zhao Y J, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11):1239~1242
- 7 任秀云,程欣,刘轩,等.基于空间光调制器的计算全息成像特性.光子学报,2005,34(1):110~113
Ren X Y, Cheng X, Liu X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1):110~113
- 8 Yoshikawa H, Kagotani A. Full color computer-generated rainbow hologram with enlarged viewing angle. *Optical Review*, 2002, 9(6):251~254
- 9 Wang H, Li Y, Jin H Z, et al. Three-dimensional visualization of shape measurement data based on

- computer generated hologram. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, **5**(9): 195~199
- 10 苏显渝, 李继陶. 信息光学. 北京: 科学出版社, 2002. 126
Su X Y, Li J T. *Information Optics*. Beijing: Science Press, 2002. 126
- 11 范诚, 江朝川, 郭履容. 从线全息图分析彩色彩虹全息. *光学学报*, 1990, **10**(9): 845~849
Fang C, Jiang C C, Guo L R. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(9): 845~849

Study on Computer Color Rainbow Hologram Coded by Single Wavelength

Cai Xiaou¹, Wang Hui², Li Yong²

¹ School of Physics and Electronic Information, Wenzhou University, Wenzhou 325003

² Institute of Optical Information, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

Received date: 2005-04-25

Abstract A novel method for making color rainbow hologram of 3D object has been proposed. Theoretical analysis has indicated that the grating structure of holograms shot by three color object points in same situation is equivalence to those shot by three monochrome object points in different proper situation when satisfying some given conditions. Combining the technique of rainbow hologram, it has studied the coding way of the information distribution for tricolor light on the hologram plane, the hologram algorithm and color hologram feature with monochromatic light, at the same time, it has worked out a satisfying solution to the problem of hologram superposition and color crosstalk. The feasibility and efficiency of the method are confirmed by experimental results.

Keywords Computer generated color holograms; Rainbow holograms; Color coded by single wavelength



Cai Xiaou was born in May 1972 in Zhejiang. She gained the B. S. degree from Zhejiang Normal University in 1994, and the M. S. degree from Zhejiang University in 1999. Now, she is a teacher of Wenzhou University. Her interest is hologram compression, data storage and practical hologram communications.