

基于频域滤波的计算机制真彩色彩虹全息图模拟再现

杨 鑫 李 勇 王 辉 吴 琼

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 提出了一种计算机制真彩色彩虹全息图模拟再现方法。根据衍射及几何光学的原理,分析了彩色彩虹全息图再现时空间观察窗口与频谱面窗口的对应关系。在计算机中构造照明光(红、绿、蓝三色)的分布,并分别与全息图相乘,采用傅里叶变换对上述结果进行频谱分析,并通过频域滤波获取与特定观察窗口位置对应的频谱信息;然后进行逆傅里叶变换得到全息面上的再现像。将逆傅里叶变换结果衍射一段距离,可得到对应于特定观察窗口、位于不同位置处的再现像。通过计算机模拟得到了与光学再现一致的结果,表明了该方法的可行性。为快速、经济地验证计算机制真彩色彩虹全息图的正确性提供了一种途径。

关键词 全息;三维显示;真彩色彩虹全息图;模拟再现;傅里叶变换

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0809001

Reconstruction of Computer Generated True Color Rainbow Hologram by Filtering in Frequency Domain

Yang Xin Li Yong Wang Hui Wu Qiong

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract A method to reconstruct computer generated true color rainbow hologram is presented. Based on the principle of diffraction and geometric optics, the relationship between the observing window in spatial domain and its corresponding window in spatial frequency domain is analyzed. The illumination beams (red, green and blue light) are constructed and multiplied by rainbow hologram respectively. The multiplied results are analyzed in spatial frequency domain with Fourier transform. The spectral information corresponding to a specific perspective window is extracted by filtering in spatial frequency domain. And then the inverse Fourier transform is introduced to obtain the reconstructed image in the hologram plane. The reconstructed images in different positions are obtained from the object wave diffracting a given distance. The experimental results prove the validity of the proposed method. It opens up a new way to evaluate the correctness of computer generated true color rainbow hologram fast and economically.

Key words holography; three-dimensional display; true color rainbow hologram; simulated reconstruction; Fourier transform

OCIS codes 090.1760; 090.1705; 090.5640

1 引 言

彩虹全息图^[1]可以白光再现,是一种实用性很强的三维显示技术^[2~5],已经广泛应用于激光防伪商标、加密、贺卡、礼品包装、艺术品展示等多个方面^[6~8]。由于采用激光拍照制作彩虹全息图对环境

有非常高的要求,并且不能实现虚拟物体的彩虹全息图制作,因此人们采用计算机模拟光学干涉原理制作彩色彩虹全息图^[9~13]。该方法不仅可以实现真实物体的记录,也可以实现虚拟物体的彩色彩虹全息图记录。计算机制彩虹全息图输出对于硬件系

收稿日期: 2012-03-09; 收到修改稿日期: 2012-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(60702078,60877002)和浙江师范大学创新团队项目资助课题。

作者简介: 杨 鑫(1988—),男,硕士研究生,主要从事计算全息与三维显示等方面的研究。

E-mail: 2006endeavour@163.com

导师简介: 李 勇(1972—),男,博士,教授,主要从事光信息处理、光学三维传感与三维显示等方面的研究。

E-mail: liyong@zjnu.cn(通信联系人)

统的要求非常严格,输出的分辨率基本为波长量级,同时全息图打印输出非常耗时^[14]。因此,在彩虹全息图打印输出前对其输出质量进行评估具有重要的意义。通过模拟再现达到“所见即所得”效果,可以方便地确定计算参数是否合适,以便及时得到更正,有利于工业上全息图大规模的生产印刷并降低成本。

文献[14]提出了一种彩色彩虹全息计算机模拟再现的方法。先将彩虹全息图分块,通过傅里叶变换得到全息图的局部空间频谱;再利用向量光线追迹^[15]的原理,确定到达观察处的复振幅分布;最后将所有的复振幅叠加得到整张全息图在特定方向上的模拟再现像。但该方法模型复杂,数据处理比较繁琐。本文根据光衍射足够长的距离后接收到的光场分布可以看成其频谱分布的原理,分析了真彩色彩虹全息图再现过程中的观察窗口与频域位置的对应关系。通过频域滤波获取与观察窗口对应的红、绿、蓝3个分量的频谱信息,利用逆傅里叶变换得到真彩色彩虹全息图的再现像。并给出了理论分析及实验验证结果。

2 基本原理

2.1 真彩色彩虹全息图计算原理

真彩色彩虹全息图的计算模型如图1所示。物点发出的光由于狭缝的限制,仅分布在全息面上的长条形区域内,该区域称为线全息。根据色度学原理,一个彩色物点可以分解为红、绿和蓝三基色。因此,彩色物点 (x_0, y_0, z_0, r, g, b) 可分解为 (x_0, y_0, z_0, r) , (x_0, y_0, z_0, g) , (x_0, y_0, z_0, b) 三分量,其中 r, g, b 为物体红绿蓝三基色的发光强度。彩色彩虹全息图可以表示为三基色物光与对应参考光干涉的线性叠加,采用双极强度^[16]计算时,真彩色彩虹全息图的透射率分布可以表示为

$$I(x, y) = A + I_r(x, y) + I_g(x, y) + I_b(x, y), \quad (1)$$

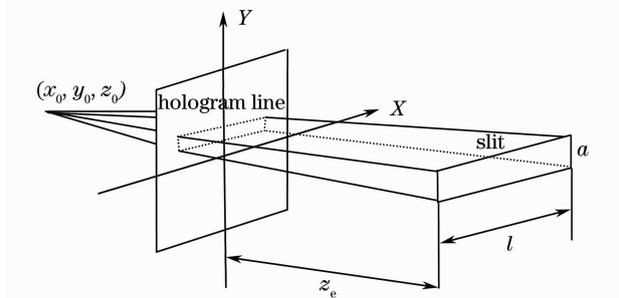


图1 彩虹全息图计算模型

Fig.1 Calculation model of rainbow hologram

式中 A 为计算时采取的偏置分量,确保 $I(x, y)$ 不为负值。 $I_r(x, y), I_g(x, y), I_b(x, y)$ 为三基色全息双极强度分布,表示为

$$\begin{cases} I_r(x, y) = \sum_{m=1}^M \frac{\sqrt{r_m}}{R_m(x, y)} \cos[\varphi_r(x, y) - \phi_r(x, y)] \\ I_g(x, y) = \sum_{m=1}^M \frac{\sqrt{g_m}}{R_m(x, y)} \cos[\varphi_g(x, y) - \phi_g(x, y)], \\ I_b(x, y) = \sum_{m=1}^M \frac{\sqrt{b_m}}{R_m(x, y)} \cos[\varphi_b(x, y) - \phi_b(x, y)] \end{cases} \quad (2)$$

式中 M 为总物点数, r_m, g_m, b_m 分别表示第 m 点的三基色发光强度。 $R_m(x, y)$ 为第 m 点到全息面的距离。 $\varphi_r(x, y), \varphi_g(x, y), \varphi_b(x, y)$ 为三基色物光在全息面上的相位分布 $\phi_r(x, y), \phi_g(x, y), \phi_b(x, y)$ 分别为三基色的参考光在全息面上的相位分布。

2.2 真彩色彩虹全息图模拟再现原理分析

图2为彩色彩虹全息图再现示意图。全息图位于 $z=0$ 平面内。当用记录时的红色参考光照明全息图时,传播距离 z_f 后的复振幅分布采用菲涅耳近似可以表示为

$$U(X, Y, z_f) = \frac{1}{j\lambda_r z_f} \iint_{\Omega} I(x, y) O_r(x, y) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z_f}[(X-x)^2 + (Y-y)^2]\right\} dx dy. \quad (3)$$

忽略积分前的常数因子,(3)式可以表示为

$$U(X, Y, z_f) = \iint_{\Omega} I(x, y) O_r(x, y) \times \exp\left[i \frac{k}{2z_f}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-i \frac{2\pi}{z_f \lambda_r}(xX + yY)\right] dx dy. \quad (4)$$

(4)式可以看作是

$$I(x, y) O_r(x, y) \exp\left[i \frac{k}{2z_f}(x^2 + y^2)\right]$$

的傅里叶变换。当 $z_f \gg \frac{1}{2\lambda_r}(x^2 + y^2)_{\max}$ 时,二次相位因子可以忽略,此时的观察平面位于夫琅禾费衍

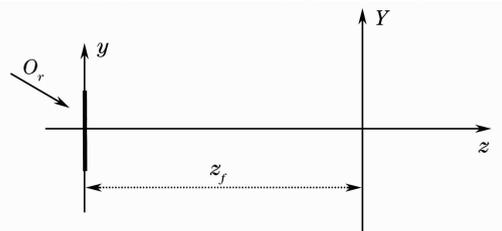


图2 彩色彩虹全息图再现示意图

Fig.2 Scheme of rainbow hologram reconstruction

射区,光场分布为全息图与参考光相乘的频谱。频谱面坐标与空间频率坐标的关系可以表示为

$$\xi = \frac{X}{\lambda_r z_f}, \eta = \frac{Y}{\lambda_r z_f}. \quad (5)$$

绿色和蓝色参考光照明再现时,情况类似。

当人眼观察全息再现像时,由于瞳孔限制,只有部分信息进入人眼。进入人眼的信息与频谱面上一定区域的频谱信息对应。因此,在特定位置上观察位于全息平面的再现像可以表示为对应区域频谱的逆傅里叶变换。下面根据几何光学原理分析观察窗

口位置与频域位置的对应关系。图3为观察窗口与频域位置对应关系示意图。全息图RGH位于 $z=0$ 平面内,长度为 l_h ,宽为 w_h 。观察窗口ABCD位于 $z=z_e$ 平面内,长和宽分别为 s_1, s_w ,中心坐标为 $S_0(x_0, y_0, z_e)$ 。频谱面位于 $z=z_f$ 的平面内。从图中可以看出,通过全息图衍射,能够进入观察窗口的信息对应于频谱面上 $A'B'C'D'$ 内的频谱信息。根据几何关系,频域矩形区域 $A'B'C'D'$ 的4个顶点的坐标可以表示为

$$\begin{cases} X_{A'} = \frac{l_h}{2} - \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{l_h}{2} - x_0 + \frac{s_1}{2} \right); & Y_{A'} = \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{w_h}{2} + y_0 + \frac{s_w}{2} \right) - \frac{w_h}{2} \\ X_{B'} = \frac{l_h}{2} - \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{l_h}{2} - x_0 + \frac{s_1}{2} \right); & Y_{B'} = \frac{w_h}{2} - \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{w_h}{2} + y_0 + \frac{s_w}{2} \right) \\ X_{C'} = \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{l_h}{2} + x_0 + \frac{s_1}{2} \right) - \frac{l_h}{2}; & Y_{C'} = \frac{w_h}{2} - \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{w_h}{2} - y_0 + \frac{s_w}{2} \right) \\ X_{D'} = \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{l_h}{2} + x_0 + \frac{s_1}{2} \right) - \frac{l_h}{2}; & Y_{D'} = \frac{z_f}{z_e} \left(\frac{w_h}{2} + y_0 + \frac{s_w}{2} \right) - \frac{w_h}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

根据(5)、(6)式可得频率坐标

$$\begin{cases} \xi_{A'} = \frac{l_h}{2\lambda z_f} - \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{l_h}{2} - x_0 + \frac{s_1}{2} \right); & \eta_{A'} = \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{w_h}{2} + y_0 + \frac{s_w}{2} \right) - \frac{w_h}{2\lambda z_f} \\ \xi_{B'} = \frac{l_h}{2\lambda z_f} - \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{l_h}{2} - x_0 + \frac{s_1}{2} \right); & \eta_{B'} = \frac{w_h}{2\lambda z_f} - \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{w_h}{2} - y_0 + \frac{s_w}{2} \right) \\ \xi_{C'} = \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{l_h}{2} + x_0 + \frac{s_1}{2} \right) - \frac{l_h}{2\lambda z_f}; & \eta_{C'} = \frac{w_h}{2\lambda z_f} - \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{w_h}{2} - y_0 + \frac{s_w}{2} \right) \\ \xi_{D'} = \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{l_h}{2} + x_0 + \frac{s_1}{2} \right) - \frac{l_h}{2\lambda z_f}; & \eta_{D'} = \frac{1}{\lambda z_e} \left(\frac{w_h}{2} + y_0 + \frac{s_w}{2} \right) - \frac{w_h}{2\lambda z_f} \end{cases}. \quad (7)$$

从而,可以通过在频域使用窗口进行滤波得到与特定观察窗口对应的频谱信息,然后采用逆傅里叶变换得到位于全息面上对应某一谱线的再现像。在用白光照明时,照明光源中所有谱线的再现像强度叠加就得到了实际的彩色全息再现像。

在计算机模拟时,采用快速傅里叶变换(FFT)得到全息图的频谱。频谱的数字坐标与物理坐标需要进行转换。根据傅里叶变换关系,频域内的采样间隔表示为

$$\begin{cases} \Delta\xi = \frac{\lambda z_f}{l_h} \\ \Delta\eta = \frac{\lambda z_f}{w_h} \end{cases}. \quad (8)$$

由快速傅里叶变换的特点可知,全息面上的再现像数字坐标与波长无关,三色再现像直接融合即可。而离开全息面后的再现像数字坐标与波长及距离有关,三色再现像需要以一个为基准,其他两个按比例

进行插值后才能融合。

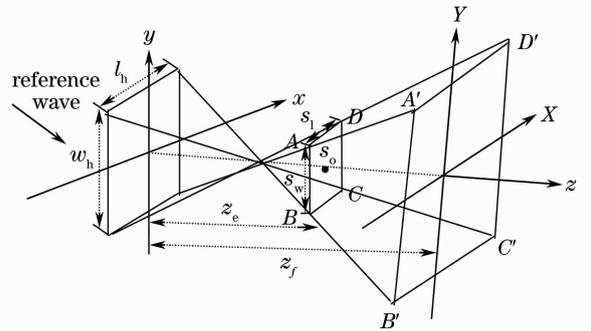


图3 观察窗口位置与频域位置对应关系示意图

Fig. 3 Scheme of relationship between the position of spatial observing window and its corresponding window in spatial frequency domain

2.3 计算机制真彩色彩虹全息图模拟再现算法

根据以上理论分析,计算机制真彩色彩虹全息图的模拟再现算法如下:

1) 根据彩虹全息图的物理尺寸和再现波长,确定满足夫琅禾费衍射条件时,全息面到频谱面的距离 z_f ;

2) 设定观察窗口大小与位置以及再现光波长,根据(7)式求出与空间观察窗口对应的频域坐标;

3) 构造一定光谱分布的照明光分别与彩虹全息相乘,并进行傅里叶变换;

4) 根据2)所得的频域窗口,在频域内进行滤波,分别进行逆傅里叶变换,得到位于全息平面上与观察窗口对应的再现像;

5) 将逆傅里叶变换的结果,分别衍射一段距离,得到不同衍射距离(人眼聚焦不同位置)处的再现像。

3 实验结果及分析

为了验证上述理论分析的正确性,本文计算了一个三维(3D)彩色小车的真彩色彩虹全息图,并进行模拟再现。3D彩色小车有效物点数为58087。受模拟再现时的内存限制,计算了小尺寸的全息图。小车物理尺寸设置为 $7.60\text{ mm} \times 3.38\text{ mm} \times 2.51\text{ mm}$ 。彩色彩虹全息图计算参数为:计算波长分别是 632.547 nm 和 467 nm ;计算时的狭缝位置位于 $z = 300\text{ mm}$ 平面内,长和宽分别为 100 mm 和 3 mm ,中心坐标为 $(0, 0, 300)$ 单位为 mm ;全息面上采样间隔为 $0.57\text{ }\mu\text{m}$ 。计算得到的彩色彩虹全息图的物理尺寸为 $8.66\text{ mm} \times 3.45\text{ mm}$,像素数为 $15194\text{ pixel} \times 6139\text{ pixel}$ 。利用实验室现有机群的一个拥有16个CPU,32 G内存的节点,采用Matlab编程,对上述全息图进行再现。对模拟再现所需的时间进行了10次测试,平均时间为2 min;而实际输出这样大小的全息图,需用30 min以上。如果加上冲洗所用的药品准备等,时间花费更长,而且化学处理操作过程复杂。

彩色彩虹全息图模拟再现时采用 $\pi/10$ 近似^[17],以蓝色参考光 λ_b 满足夫琅禾费衍射区的距离作为全息面到频谱面的距离,可表示为

$$z_f = \frac{5}{2\lambda_b} (\omega_h^2 + l_h^2). \quad (9)$$

此时,红色和绿色参考光再现时,按照 z_f 距离近似可以满足夫琅禾费衍射距离,对于红、绿、蓝参考光分别使用(7)计算各自对应的频域分布区域,然后用(8)式分别求出频域采样间隔,从而通过频域滤波得到特定观察窗口特定波长再现时的频域信息。进行逆傅里叶变换,合成位于全息面上的彩色再

现像。

首先在彩色彩虹全息图计算时设置的狭缝位置进行模拟再现。根据人眼瞳孔的大小,将观察窗口的大小设置为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。图4(a)~(c)分别为左视图,正视图和右视图,观察窗口中心坐标分别为 $(-31, 0, 300)$, $(0, 0, 300)$ 和 $(31, 0, 300)$,单位为 mm 。从再现结果可以看出,人眼沿着水平方向移动时,可以看到物体不同视角的信息,观察颜色不发生变化。在正视图再现结果中的白色轮廓线对应于彩色彩虹全息图的轮廓。在频域内,该轮廓所对应的频域信息为 ξ 方向的低频信息。因此,模拟再现结果的正视图中存在白色的轮廓线,而左右视图对应频域高频信息,不存在全息图轮廓线问题。

为了便于比较,按照相同的彩色彩虹全息图计算参数,将3D小车物理尺寸进行放大,计算了一幅 $41.6\text{ mm} \times 15.9\text{ mm}$,像素数为 $72629\text{ pixel} \times 27724\text{ pixel}$ 的真彩色彩虹全息图并进行光学再现。图4(d)为小车模型屏幕显示截图。与模拟结果进行比较可以看出,采用本文的模拟再现方法能够比较准确地得到原小车的再现结果。图4(e)为通过数码相机拍到的光学再现结果,拍摄条件为:在暗室内以卤素灯作为照明光源,使用索尼W630相机进行拍照。由于拍摄距离较近,彩虹全息图拍摄时正确聚焦比较困难,导致了拍摄结果的模糊。再现光源的光谱分布与计算时的设置有差异,保证相机位置与设计观察位置相同比较困难,拍摄的再现像颜色与原始图像颜色有差异。但人眼视觉观察效果与原始图像符合较好。

然后模拟了狭缝上下移动(相当于观察者眼睛上下移动)时的再现像变化情况。图5(a)为当观察窗口位置上移 10 mm 时的再现像,所对应的观察窗口中心坐标为 $(0, 10, 300)$ 。图5(b)为观察窗口向下平移 10 mm 时位于全息面上的再现像,与其相对应的观察窗口中心坐标为 $(0, -10, 300)$ 。模拟结果与实际人眼上下移动观察彩色彩虹全息图再现像一致。

最后分析了衍射一定距离(眼聚焦于不同位置处)时的再现像情况,模拟了眼睛离焦时的再现像情况。图6为观察窗口中心位置为 $(0, 0, 300)$ 时,眼睛聚焦在全息面前方 5 mm (相当于离焦)的再现像。图6(a)~(c)分别为单色衍射的再现像。图6(d)为经过插值运算合成的彩色再现像情况。再现像出现模糊,与理论结果相符。



图 4 彩色彩虹全息图模拟再现与光学再现结果。(a)左视图;(b)正视图;(c)右视图;
(d) 3D 小车的截图;(e)光学再现(数码相机拍摄)

Fig. 4 Simulated results and optical reconstruction result. (a) Left view; (b) front view; (c) right view;
(d) a screen-shot of 3D car; (e) optical reconstruction (captured by camera)

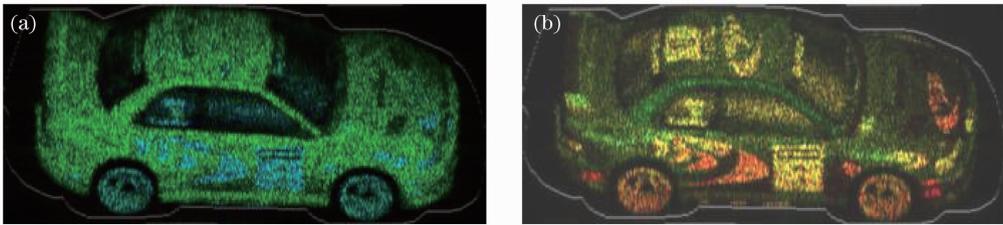


图 5 观察窗口上下平移时的再现像。(a)窗口向上平移 10 mm;(b)窗口向下平移 10 mm

Fig. 5 Reconstructed images when observing window is moved up and down. (a) Reconstructed image viewed
10 mm up from center; (b) reconstructed image viewed 10 mm down from center

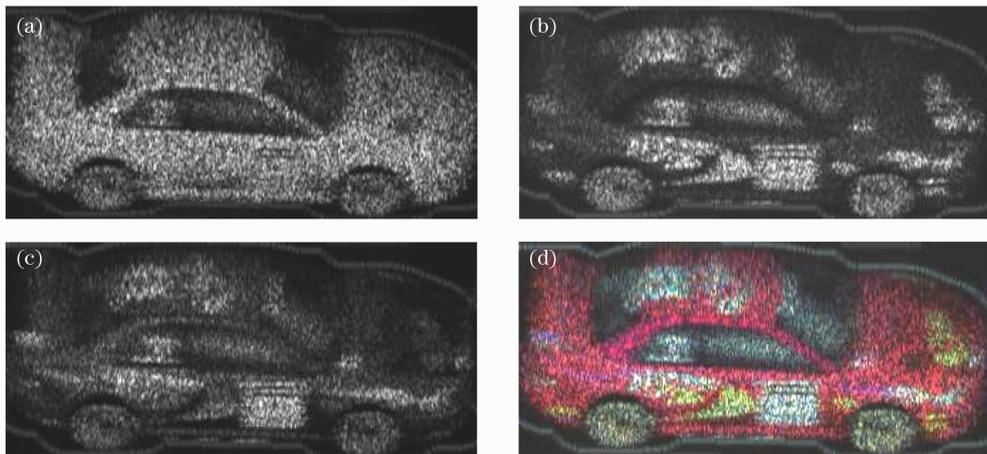


图 6 正视图衍射距离 5 mm 处的再现像。(a)红色分量衍射再现像;(b)绿色分量衍射再现像;
(c)蓝色分量衍射再现像;(d)合成的彩色再现像

Fig. 6 Reconstructed images of front view at diffraction distance $z=5$ mm. (a) Reconstructed image of red segment;
(b) reconstructed image of green segment; (c) reconstructed image of blue segment; (d) color reconstructed image

4 结 论

计算机制彩虹全息图在实际中有广泛的应用,但采用直接打印输出的方式来验证全息图的参数设置是否合适,而且花费时间较长,化学处理操作也很复杂。因此,本文提出了一种计算机制彩色彩虹全息图的模拟再现算法。通过衍射结合几何光学原理分析,得到空间观察窗口位置与频域位置的对应关系,理论上可以分析空间任意观察位置的再现像情况。给出了几个典型观察位置再现像情况并与光学再现结果进行了比较,证明了本文方法的有效性。该方法为方便快捷地验证彩色彩虹全息图的正确性提供了一种有效的途径。

参 考 文 献

- 1 S. A. Benton. Hologram reconstruction with extended incoherent sources[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(10): 1541~1546
- 2 Hiroshi Yoshikawa, Hiroyuki Taniguchi. Computer generated rainbow hologram[J]. *Opt. Rev.*, 1999, **6**(2): 118~123
- 3 Lucilla Croce Ferri. Visualization of 3D information with digital holography using laser printers[J]. *Computer & Graphics*, 2001, **25**(2): 309~321
- 4 Ying Chaofu, Ma Lihong, Wang Hui *et al.*. Digital holograms with large viewing angle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 87~91
应朝福, 马利红, 王 辉 等. 大视角数字全息的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 87~91
- 5 Wang Hui. Development status of digital holography and its application in 3D display and detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 19~23
王 辉. 数字化全息及其在三维显示和检测中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(8): 19~23
- 6 Yang Shangong, Du Xuri, Chen Haiyun *et al.*. Color rainbow holography combining computer-generated hologram and optical hologram[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 74~77
杨上供, 杜旭日, 陈海云 等. 计算机与光学方法相结合的彩色彩虹全息技术[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(1): 74~77
- 7 Xie Jinghui, Yang Hui. Design and synthesis of dispersion viewing window rainbow hologram[J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(9): 705~708
- 谢敬辉, 杨 辉. 彩虹全息图色散观察窗的设计与综合[J]. *中国激光*, 1991, **18**(9): 705~708
- 8 Gu Yongqiang, Miao Erlong, Gao Songtao *et al.*. Accuracy analysis on paraboloid calibration with computer-generated holography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1208005
- 谷勇强, 苗二龙, 高松涛 等. 计算全息法标定抛物面精度分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1208005
- 9 Wang Hui, Li Yong, Jin Hongzhen *et al.*. A new method for computer generated rainbow hologram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1537~1540
- 王 辉, 李 勇, 金洪震 等. 计算机制彩虹全息图的新算法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1537~1540
- 10 Yile Shi, Hui Wang, Yong Li *et al.*. Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(21): 4219~4226
- 11 Gan Liangqin, Wang Hui, Li Yong *et al.*. A new method of making three-dimensional color holograms by combining computer with optics holography [J]. *Journal of Zhejiang Normal University (Nat. Sci.)*, 2007, **30**(1): 21~26
- 甘亮勤, 王 辉, 李 勇 等. 计算机与光学联合制作三维物体彩色全息图的新方法[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2007, **30**(1): 21~26
- 12 Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi. Computer-generated holograms for 3D display[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1079~1082
- 13 Jin Hongzhen, Lu Yiming, Wang Hui *et al.*. Integral color hologram of virtual 3D object genetated by intergral photography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 金洪震, 楼益民, 王 辉 等. 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 14 H. Yoshikawa, T. Yamaguchi, H. Fujita. Computer simulation of reconstructed image from rainbow hologram[C]. Conference on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, 2007. DTuD3
- 15 H. W. Holloway, R. A. Ferrante. Computer analysis of holographic systems by means of vector ray tracing[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(12): 2081~2084
- 16 M. E. Lucente. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *J. Electronic Imaging*, 1993, **2**(1): 28~34
- 17 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 46~47
- 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 46~47

栏目编辑:何卓铭