

doi: 10.3788/gzxb20134203.0331

利用数值再现实现彩虹全息色差评价

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: 为了在计算机制彩色彩虹全息图输出之前定量得到再现像的色彩保真度, 提出了一种采用数值再现进行色差评价的方法. 首先对彩虹全息图进行了频谱分析, 得到再现参量与频谱分布之间的关系; 然后采用频域滤波算法实现彩色彩虹全息图数值再现, 得到再现像的相对功率谱分布; 最后采用 CIE1976 UCS 均匀颜色空间对再现像色差情况进行了计算. 设计了 7 个色块并制作了计算机制真彩色彩虹全息图, 以金卤射灯作为照明光源进行了光学再现实验, 给出实验结果及分析. 研究证明了采用数值再现方法实现对计算彩虹全息再现像光谱分布和色差进行计算分析是一种快速经济的方法.

关键词: 计算机制全息; 三维显示; 真彩色彩虹全息图; 模拟再现; 色差评价

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)03-0331-5

Color Difference of Computer Generated Rainbow Hologram Based on Numerical Reconstruction

YANG Xin, LI Yong, WANG Hui, WU Qiong

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

Abstract: In order to obtain color fidelity of reconstructed image before the computer generated rainbow hologram printed and reconstructed optically, a color difference test method based on numerical reconstruction is proposed. Firstly, the computer generated rainbow hologram is analyzed in special frequency domain. The relationships between reconstruction parameters and special frequency distribution are concluded. Then, the spectrum distributions of reconstructed images are obtained through simulated reconstruction of computer generated rainbow hologram by filtering in frequency domain. Moreover, the color difference of reconstructed image is calculated in CIE1976 UCS uniform color space. Seven color cards are designed and with its computer generated rainbow holograms. The color differences are tested with the proposed method. The optical experiments are designed with the illumination of halogen light source. The results and analysis are presented and show that the proposed method is effective and fast way for the analysis of spectral distribution and color difference of computer generated rainbow hologram.

Key words: Computer generated hologram; 3D display; True color rainbow hologram; Simulated reconstruction; Color-difference evaluation

0 引言

彩虹全息^[1]可以白光再现, 是一种重要的三维显示技术^[2-4]. 计算机制彩色彩虹全息^[5-6]相比于光学全息, 具有显著的优势, 不仅可以实现真实物体全息图的记录, 也可以实现虚拟物体的全息记录; 计算

波长不受现有激光器的约束, 可以根据需要进行设置, 并且其它参量设计也相当灵活, 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. 因此计算机制彩色彩虹全息的研究具有重要的意义.

彩色彩虹全息图能够实现三维物体的真彩色显

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 60702078, 60877002)和浙江师范大学创新团队资助

第一作者: 杨鑫(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机制全息与三维显示. Email: 2006endeavour@163.com

导师(通讯作者): 李勇(1972-), 男, 教授, 主要研究方向为光信息处理、光学三维传感与三维显示. Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2012-08-20; 录用日期: 2012-10-24

示,其显示颜色机制的分析以及测量对提高彩虹全息再现质量至关重要^[7-8].彩色彩虹全息图的颜色再现准确度是衡量全息图质量的重要指标之一^[9-10],给出定量的彩虹全息图再现像与原始物体的色差具有重要的实用价值.一些学者对于彩虹全息图的再现情况进行了测量分析^[10-13],然而对于计算彩虹全息,将全息图输出后,再进行色差评价,耗时长、需要的测量设备多,也不经济.为此,本文研究了采用数值再现的方法进行计算机彩虹全息再现像色差评价,节省时间和费用,给出了原理和实验结果.

1 基本原理

1.1 彩色彩虹全息图的频域分析

根据全息图的双极强度公式^[11],计算机彩虹全息图的透过率函数可以写为

$$I(x, y) = \sum_{i=r, g, b} A_i(x, y) \cos [\varphi_i(x, y) - \frac{2\pi}{\lambda_i} y \sin(\theta)] + \tau \quad (1)$$

式中 τ 为一偏置分量,确保 $I(x, y)$ 大于等于零, $A_i(x, y)$ 和 $\varphi_i(x, y)$ 为物光振幅分布和相位分布. λ_i 和 $\sin(\theta)$ 分别为全息记录三基色波长和物参夹角.

不考虑偏置分量,对彩色彩虹全息图进行傅里叶变换得

$$\begin{aligned} F(\xi, \eta) &= \iint_{\Omega} I(x, y) \exp[-j2\pi(x\xi + y\eta)] dx dy = \\ &= F_1(\xi, \eta) + F_2(\xi, \eta) + F_3(\xi, \eta) + F_4(\xi, \eta) = \\ &= \sum_{i=r, g, b} G_i(\epsilon, \eta - \frac{\sin(\theta)}{\lambda_i}) + \sum_{i=r, g, b} G_i^*(-\epsilon, \\ &= -\eta - \frac{\sin(\theta)}{\lambda_i}) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中包含七项,第七项为一个 δ 函数, $G_r(\xi, \eta)$ 、 $G_g(\xi, \eta)$ 、 $G_b(\xi, \eta)$ 分别为物体三基色光信息的傅里叶变换, $G_r^*(\xi, \eta)$ 、 $G_g^*(\xi, \eta)$ 、 $G_b^*(\xi, \eta)$ 为三基色物光共轭的傅里叶变换.可以看出计算机彩虹全息图的频域分布是物体三基色分量的频谱分布在频域内的频移,频移量由参物光夹角和波长决定.

彩色彩虹全息图正确计算时,其频谱面分布如图1所示,本文仅分析在 η 方向上频谱分布.在频谱面上存在正负一级和零级,正负一级中对应分布着

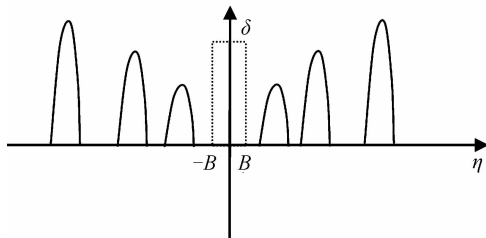


图1 彩虹全息图频谱分布

Fig.1 The spectral distribution of color rainbow

物体三基色对应的频带信息.图中虚框是彩虹全息图计算时,设置的狭缝位置对应的频域区域.当人眼位于原设置狭缝位置观察时,看到的再现像对应于该虚框内的频谱信息.

以 θ' 为入射角,用波长为 λ 的平面波照明彩色彩虹全息图时,不考虑偏置项的影响,彩色彩虹全息图与再现光波相乘的频谱可以表示为

$$\begin{aligned} F'(\xi, \eta) &= F(\xi, \eta + \frac{\sin(\theta')}{\lambda}) = \sum_{i=r, g, b} G_i(\epsilon, \eta - \\ &= \frac{\sin(\theta)}{\lambda_i} + \frac{\sin(\theta')}{\lambda}) + \sum_{i=r, g, b} G_i^*(-\epsilon, \\ &= -\eta - \frac{\sin(\theta)}{\lambda_i} - \frac{\sin(\theta')}{\lambda}) \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)可知,当采用原红绿蓝三原色光再现,并且再现时的入射角和记录时入射角相同时,物体对应的频谱分布能够完全进入所设置的虚框内,实现真彩色显示.

1.2 观察窗口的选频特性

人眼观察彩虹全息再现像时,瞳孔相当于滤波器,对彩虹全息的频谱进行了选择,进入人眼的是其频谱中的一部分^[12].观察窗口(瞳孔)大小、位置与频域位置对应关系如图2所示,再现波长为 λ .全息

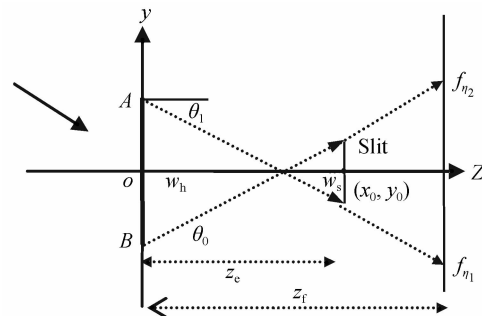


图2 观察窗口的选频特性示意图

Fig.2 The frequency-selection characteristic of observing slit

面位于 $z=0$ 平面内,宽度为 w_h ,观察狭缝位于 $z=z_c$ 平面内,宽度为 w_s ,观察狭缝中心坐标 (x_0, y_0) ,所能观察到的信息在 y 方向上由全息面上的顶点 A 和 B 决定.频谱面位于 $z=z_i$ 平面内,由图可知,观察狭缝内的光波信息与频域内一定频谱范围对应.全息再现时,对于 A 点,衍射光场恰好能够进入观察狭缝下边界时对应的衍射角度为 θ_1 ,可以求出观察狭缝观察到的信息在频域范围为

$$\begin{aligned} f_{\eta_1} &\approx \frac{\sin(\theta_1)}{\lambda} + \frac{y_0}{\lambda z_c} \\ f_{\eta_2} &\approx \frac{\sin(\theta_2)}{\lambda} + \frac{y_0}{\lambda z_c} \end{aligned} \quad (4)$$

观察窗口设计时关于 z 轴对称,并且观察距相对于观察窗口大很多,得到

$$-\frac{\sin(\theta)}{\lambda} < f_{\eta} < \frac{\sin(\theta)}{\lambda} \quad (5)$$

$$\sin(\theta) \approx \frac{w_s + w_h}{2z_c}$$

式中 $\theta = -\theta_1, \theta = \theta_2$.

根据观察窗口位置与频域位置的关系,可以构造再现光,与全息图相乘,频域滤波然后傅里叶逆变换得到位于全息面上的再现像,复色光再现时的再现像是每种光波再现像的叠加.

1.3 彩虹全息图色差分析

CIE1976UCS图^[13]是CIE在1976年规定,是一种亮度大致相同条件下一种更为均匀的颜色空间.色度坐标 u', v' 定义为

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3} \quad (6)$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3}$$

式中 X, Y, Z 是CIE1931XYZ颜色系统三刺激值, x 和 y 为色度坐标.在CIE1976UCS色坐标体系中,颜色偏差由测量点在CIE1976UCS色度图中的欧氏距离决定,表示为

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \quad (7)$$

具体色差计算过程如下:

1) 选定可见光范围,模拟试验中,选择可见光范围为400 nm到780 nm,波长间隔为1 nm;

2) 根据观察窗口的选频特性确定频域滤波窗口;

3) 对选定可见光范围内的波长,按照原记录时参物夹角,构造参考光,分别与全息图相乘,通过频域滤波得到全息面上的再现像,取再现像上强度平均值作为该波长再现时所对应的强度.经过计算,最终得到功率谱分布;

4) 根据模拟所得的功率谱分布,求出再现像在CIE1931XYZ颜色系统下色度坐标,求出色度坐标 u'_1, v'_1 ;

5) 根据设计的色块,由RGB转换为X、Y、Z三刺激值(RGB转换到XYZ三刺激值的转换关系^[14]如式(8)所示),然后求出在1976UCS的色度坐标 u'_0, v'_0 ;

6) 求色差 $\Delta u'v'$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 实验及结果

2.1 模拟实验结果

根据本实验室全息输出系统情况,计算机拟彩

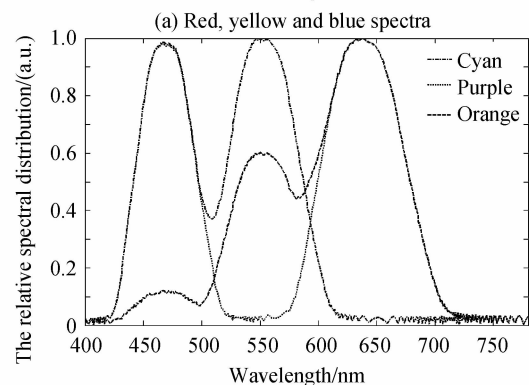
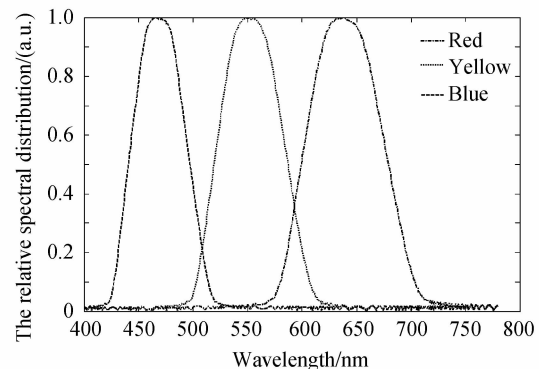
色彩虹全息图计算时的参物夹角设置为 14.5° ,狭缝宽度设置为3 mm,狭缝到全息平面的距离设置为300 mm.彩色彩虹全息图计算时,为了能够使再现像与我国目前采用的电视PAL颜色系统一致,彩色彩虹全息图的三基色所围成的色度区域,应该包含PAL三基色在CIE1931XYZ颜色系统中组成的三角形区域,选择计算全息三个主波长分别为:632、547、464 nm.

按照上述分析的计算参量,设计了7个色块并计算其彩色彩虹全息图.每个色块的像素点为 200×200 ,物理尺寸为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$.全息面上采样间隔为 $0.57 \mu\text{m}$,像素数为 $9\,043 \times 8\,974$.

设置观察窗口中心坐标为 $(0, 0, 300)$,窗口大小为 $3 \times 3 \text{ mm}^2$.计算对应的频域区域坐标,然后将可见光波范围设定在400 nm到780 nm,波长间隔为1 nm,每种波长的振幅都为1,分别与全息图相乘,通过频域滤波,采用傅里叶逆变换得到位于全息面上的再现像,将再现像的平均强度作为该光波再现时的强度分布,最终获得再现像的相对功率谱分布曲线.

图3给出7种色块制作的计算机拟彩色彩虹全息图模拟再现得到的功率谱分布,分别进行了归一化处理,横坐标为波长,单位为nm.

表1给出了色块设计参量,色块在CIE1976UCS色度坐标下的色度值 u'_0 和 v'_0 ,以及数值再现像的色度坐标 u'_1, v'_1 ,色差 $\Delta u'v'$.



(b) Cyan, purple and orange spectra

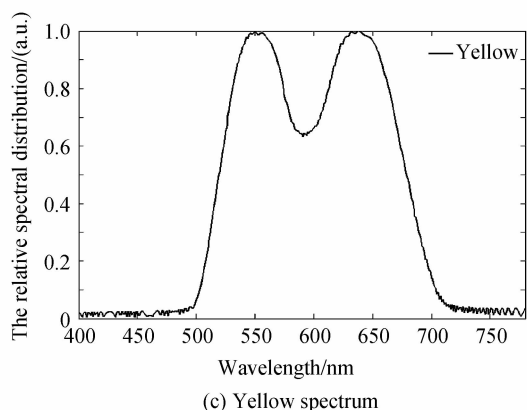


图3 色块全息再现光谱分布曲线

Fig. 3 The spectrum distributions of holograms of color cards

表1 色卡参量及色差参量

Table 1 The parameters of color cards and color differences

	Red	Green	Blue	Orange	Cyan	Purple	Yellow
R	255	0	0	247	0	255	255
G	0	255	255	148	255	0	255
B	0	0	0	28	255	255	0
u_0	0.450 7	0.125	0.175 4	0.235 7	0.1383	0.305	0.203 9
v_0	0.522 9	0.562 5	0.157 9	0.532 1	0.455 5	0.329 8	0.552 9
u_1	0.458 7	0.150 8	0.140 3	0.266	0.148 2	0.308 2	0.232
v_1	0.525 8	0.572	0.225 7	0.542 4	0.481 8	0.379 5	0.548 4
$\Delta u'v'$	0.085	0.027 5	0.076 3	0.032	0.028 1	0.049 8	0.028 5

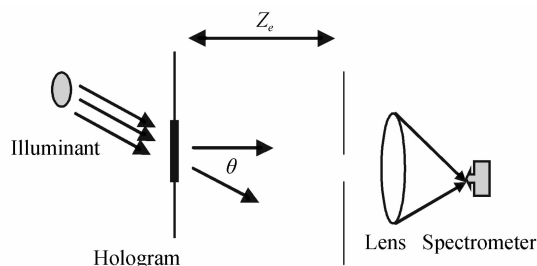
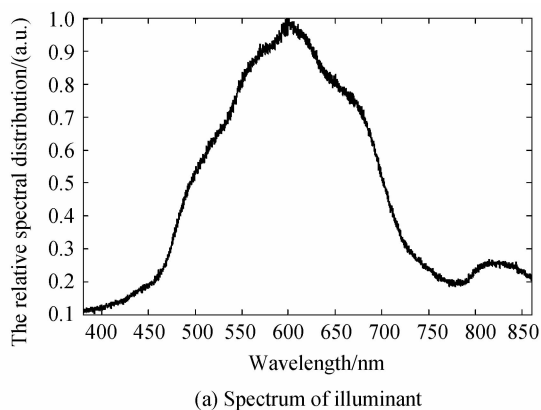


图4 实际光学再现测量系统

Fig. 4 The spectrum distribution measuring system of computer generated rainbow color hologram

谱分布. 光谱仪采用的是 Ocean Optics 公司的 USB4000 光纤光谱仪, 照明光源是功率为 100 W 的



(a) Spectrum of illuminant

2.2 光学实验及结果

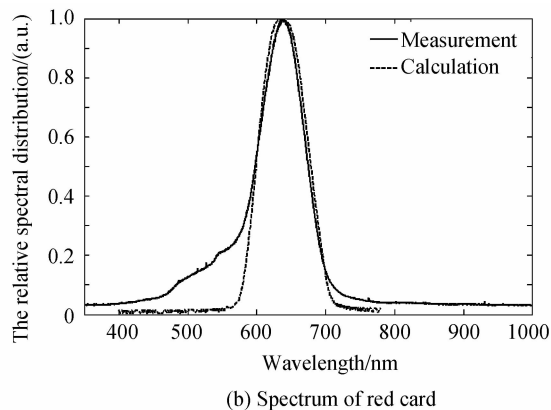
为了说明数值再现的正确性, 进行光学再现测量实验. 首先, 将色块数据转换为 r, g, b 数据和空间坐标数据, 采用实验室编写的彩色彩虹全息点云算法程序进行计算得到计算彩虹全息图, 然后通过全息输出系统, 将全息条纹曝光在天津 III 型干板上, 通过显影、定影、漂白得到可实际再现的计算彩虹全息图. 全息图的计算参量与上面设计一致, 直接用于输出的全息图尺寸进行了放大, 像素数为 $41\ 226 \times 39\ 461$. 再现光路如图 4 所示, 光源以全息记录时物参夹角进行照明, 在正对全息图, 距离 $Z_e = 300$ mm 处设置 3 mm 的狭缝, 狭缝后放置透镜, 通过透镜聚焦使得进入狭缝的再现光波进入光谱仪, 测得功率

金卤射灯.

图 5 给出所测得的光源的相对功率谱分布以及红、绿和黄色色卡再现像的归一化光谱分布情况, 同时绘出数值计算得到的光谱分布情况. 红、绿和黄色色卡全息再现像与标准色卡的色差分别 0.118 9、0.042 1 和 0.030 3, 与数值再现色差基本吻合. 数值计算得到再现光谱分布与光学再现光谱分布基本一致, 说明了数值再现的正确性.

2.3 分析

在本文数值再现中, 进行了一定的假设: 再现光夹角为原参物夹角, 振幅设置为 1, 不考虑全息记录



(b) Spectrum of red card

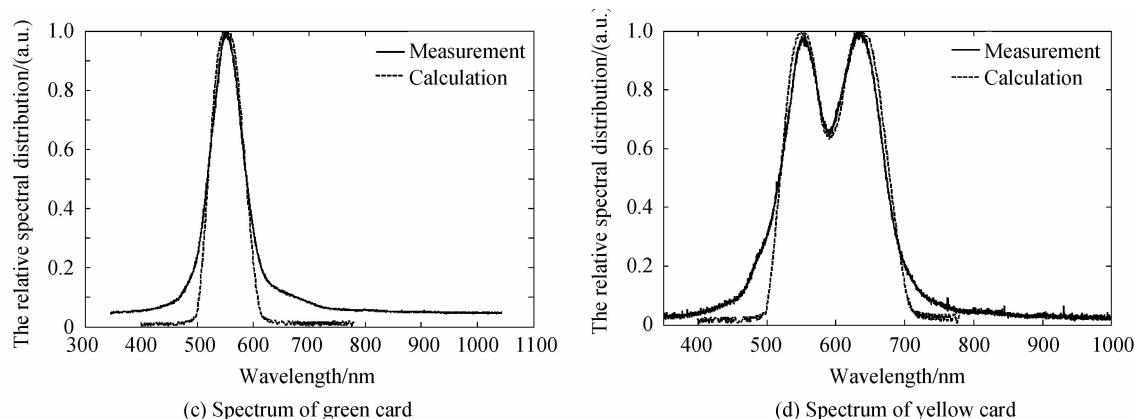


图5 实际光学再现测量的功率谱分布曲线

Fig. 5 The relative spectral distributions of optical reconstruction

干板对光的吸收情况,对可见光波段进行了离散化,将每一种可见光再现的强度均值作为这种光波再现的强度,得到了相对功率谱分布,做均值处理使得计算得到的光谱分布下降变缓,但与实际光学再现情况基本吻合。

光学再现时,在计算波长位置,红色和绿色的能量相差不多,并且能量较强,测得了与数值再现比较一致的结果,蓝色色卡的再现由于蓝光能量低,杂散光影响很大,存在着较大的计算误差。

本文中提出的数值再现方法,能够对再现光谱分布进行预测并对色差进行计算。在实际计算机制彩色彩虹全息图计算中,直接采用计算机中RGB颜色数据计算而不考虑实际再现光源光谱分布,对于某些颜色,再现将会存在较大色差。这种颜色转换与匹配将是我们要研究的问题。

3 结论

再现像色差是计算机制彩色彩虹全息图质量的重要指标之一。本文从计算机制彩色彩虹全息图频域入手,分析了计算机制彩色彩虹全息图频域特性及观察窗口的选频特性。采用频域滤波的方法能够实现彩色彩虹全息图数值再现,得到了再现波长与再现强度的曲线分布,在1976USC色度系统下进行了色差计算,并进行了光学实验,证明了数值再现法的正确性,为快速经济的进行彩虹全息再现像色差分析提供一种途径。

参考文献

[1] BENTON S A. Hologram reconstructions with extended incoherent sources[J]. *JOSA*, 1969, **59**(11): 1541-1546.
 [2] YOSHIKAWA H, TANIGUCHI H. Computer generated rainbow hologram[J]. *Optical Review*, 1999, **6**(2): 118-123.
 [3] FERRI L C. Visualization of 3D information with digital holography using laser printers[J]. *Computer & Graphics*, 2001, **25**(2): 309-321.
 [4] YING Chao-fu, MA Li-hong, WANG Hui, et al. Digital holograms with large viewing angle[J]. *Chinese Journal of*

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, LI Yong, JIN Hong-zhen, et al. A new method for computer generated hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1537-1541.
 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): 1537-1541.
 [6] CAI Xiao-ou, WANG Hui, LI Yong. Study on computer color rainbow hologram coded by single wavelength [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1013-1017.
 蔡晓鸥,王辉,李勇.单波长编码计算机制彩色彩虹全息图的研究[J].*光子学报*, 2006, **35**(7): 1013-1017.
 [7] SHI Yi-le, WANG Hui, WU Qiong. Color transmission analysis of color computer generated holography[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(20): 4767-4744.
 [8] SHI Yi-le, WANG Hui, WU Qiong, et al. Color reproduction mechanism analysis of computer-generated color rainbow holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(9): 0909004.
 施逸乐,王辉,吴琼,等.计算彩色彩虹全息术颜色复现机理分析[J].*中国激光*, 2012, **39**(9): 0909004.
 [9] SHI Yi-le. The theoretical and technical research of produce hologram of real-existing objects by computer-generated holography[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010: 26-35.
 施逸乐.计算机制实际物体彩色全息图的理论与计算研究[D].金华:浙江师范大学,2010:26-35.
 [10] YING Chao-fu. Color quality evaluation of color hologram's reconstructed images [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
 应朝福.彩色全息图再现像颜色质量的评价[D].杭州:浙江大学,2001.
 [11] LUCENTE M E. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, **2**(1): 28-34.
 [12] YANG Xin, LI Yong, WANG Hui, et al. Reconstruction of computer generated true color rainbow hologram by filtering in frequency domain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(8): 0809001.
 杨鑫,李勇,王辉,等.基于频域滤波的计算机制真彩色彩虹全息图模拟再现[J].*中国激光*, 2012, **39**(8): 0809001.
 [13] LIU Cui-ping, YU Jia, LI Xu-yan, et al. Colorimetric research on LED displaying color holograms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 218-221.
 刘翠萍,于佳,黎旭艳,等.LED用于彩色全息图照明的色度研究[J].*光子学报*, 2012, **41**(2): 218-221.
 [14] 周世生.印刷色彩学[M].北京:印刷工业出版社,2008.