

doi: 10.3788/gzxb20134201.0104

彩色计算全息颜色匹配的研究

施逸乐, 王辉, 吴琼, 李勇, 金洪震

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要: 基于色度学原理, 研究了彩色计算全息颜色的匹配问题, 给出了电子显示色系下颜色量与计算全息物光波振幅之间的等色传递关系. 首先, 讨论了电子显示色系和彩色计算全息色系之间的颜色传递问题, 并且给出了这两个色系下颜色量的转换方法. 其次, 以彩色全息再现像与原始计算目标颜色一致为目的, 分析了彩色计算全息色系下的颜色量与其对应物光波振幅的关系, 并得出了颜色量和物光波振幅间应满足的一般方程. 最后, 本文选取 PAL 制式彩色显示色系下的彩色目标为全息图计算物体进行了彩色全息显示实验, 结果表明本文所述彩色计算全息颜色匹配方法是有效的. 本文的研究工作将为彩色计算全息显示的实用化奠定一定的理论基础和技术依据.

关键词: 计算全息; 彩色全息; 全息显示; 色度学

中图分类号: O432

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0104-6

Color Matching of Color Computer-generated Holography

SHI Yi-le, WANG Hui, WU Qiong, LI Yong, JIN Hong-zhen

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

Abstract: Color matching issue of (Color Computer-generated Holography, CCGH) is researched based on colorimetric principle. The conversion between color quantity in electronic display colorimetric system and amplitude of object light in CCGH colorimetric system is given. Firstly, the conversion between color quantities in electronic display and CCGH colorimetric system is discussed. Then, the conversion method for color quantity in the two colorimetric systems is given. Secondly, isochromatic transfer relationship of color quantity and amplitude of object light field is proposed. Thirdly, we chose a color image from PAL-RGB colorimetric system as an experimental object of CCGH. The experimental results demonstrate that our novel approach is feasible. The research of this paper will provide theoretical and technical basis for practical use of CCGH.

Key words: Computer holography; Color holography; Holographic display; Colorimetry

0 引言

由于计算全息的灵活、方便、廉价以及可进行完美的波前再现等诸多优点, 目前已成为实现三维显示的重要技术之一^[1-3], 近年来其在静态和动态三维显示方面的应用都取得重要的进展^[4-8]. 对于实用彩色计算全息三维显示, 颜色匹配是一个非常重要的问题, 它直接关系到再现像颜色复现质量, 但至今尚

未见相关报道. 至今为止, 彩色计算全息的颜色传递都默认按照彩色数字图像的颜色进行匹配^[9], 例如, 对于白色数字图像其三原色的颜色比例为 1 : 1 : 1, 当计算白色物体全息图时, 认为三原色对应的物光振幅也为 1 : 1 : 1, 虽然由于人眼颜色视觉的恒常性^[10], 仍能感觉到比较满意的再现质量, 但很明显这不是严格的颜色复现. 众所周知, 彩色计算全息所用的颜色信息是彩色数字图像信息, 它既可以是

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60877002)、浙江省自然科学基金(No. Z1080030)和浙江师范大学创新团队项目资助

第一作者: 施逸乐(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光信息处理与全息技术、微纳米制造技术. Email: znu_syl@163.com

导师(通讯作者): 王辉(1958-), 男, 教授, 主要研究方向为信息光学、全息技术、三维信息显示理论与技术、衍射光学. Email: wh@zjnu.cn

收稿日期: 2012-07-06; 录用日期: 2012-08-06

计算机建模的彩色虚拟物体(图像)、也可以是通过照相或扫描设备采集的实际场景彩色数字图像,它的颜色传递过程一般由彩色电视的 RGB 三原色系统决定^[11-13],即 PAL-RGB 或 NTSC-RGB. 然而,彩色全息图再现是通过衍射成像,衍射像的颜色由计算全息图编码时原色物光波的振幅、全息图的类型和再现光的光谱分布决定. 在彩色计算全息显示中,所谓“彩色的精确重现”指的是再现像的颜色与 PAL-RGB 或 NTSC-RGB 色系下的颜色两者在色度计量上完全相等,计算全息显示实际上是一项彩色信息传递技术,要真正提高全息再现像的颜色质量必须对彩色计算全息颜色信息的传递过程进行深入的研究.

本文基于颜色匹配及传递原理,研究了彩色计算全息颜色信息的传递过程,得出了电子显示色系和彩色计算全息色系之间颜色量的传递关系,同时给出了电子显示色系颜色量与彩色计算全息物光波振幅之间的转换关系.

1 彩色计算全息颜色系统和电子显示颜色系统的关系

研究目标是将电子彩色显示的三原色系统 $[R_e G_e B_e]$ 转换为彩色全息三原色系统 $[R_h G_h B_h]$. 作为颜色标准,国际照明委员会制定了标准色度学系统,即 1931 CIE-XYZ 系统. 所有其它的颜色系统都可以与之相互转换. 设 $[RGB]$ 是某一三原色系统,其三原色分别为 $(R), (G), (B)$, 它们在 1931 CIE-XYZ 系统中的色度坐标分别为: $x_r, y_r, z_r; x_g, y_g, z_g; x_b, y_b, z_b$, 根据色度学色系的转换原理^[13], 任意颜色 C 在 $[RGB]$ 和 $[XYZ]$ 色系下的三刺激值(颜色量) R, G, B 和 X, Y, Z 应该满足关系

$$\begin{aligned} X &= C_r x_r R + C_g x_g G + C_b x_b B \\ Y &= C_r y_r R + C_g y_g G + C_b y_b B \\ Z &= C_r z_r R + C_g z_g G + C_b z_b B \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{y_g z_b - y_b z_g}{C_r \Delta'} X + \frac{x_b z_g - x_g z_b}{C_r \Delta'} Y + \frac{x_g y_b - x_b y_g}{C_r \Delta'} Z \\ G &= \frac{y_b z_r - y_r z_b}{C_g \Delta'} X + \frac{x_r z_b - x_b z_r}{C_g \Delta'} Y + \frac{x_b y_r - x_r y_b}{C_g \Delta'} Z \\ B &= \frac{y_r z_g - y_g z_r}{C_b \Delta'} X + \frac{x_g z_r - x_r z_g}{C_b \Delta'} Y + \frac{x_r y_g - x_g y_r}{C_b \Delta'} Z \end{aligned} \quad (2)$$

式中系数 Δ' 由以下行列式确定

$$\Delta' = \begin{vmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{vmatrix} \quad (3)$$

对于电子显示系统 $x_r, y_r, z_r; x_g, y_g, z_g; x_b, y_b,$

z_b 都是已知的, 式中的 C_r, C_g 和 C_b 可以通过白光的匹配求出. 在 $[RGB]$ 系统中一般规定当 $R : G : B = 1 : 1 : 1$ 时匹配成为白光, 但“白光”在色度学中是有很多种的, 在彩色电子显示系统中, 一般将标准光源 D_{65} 作为参照白, 通过查表^[13], 可以得到 D_{65} 光源在 1931 CIE-XYZ 系统中三刺激值比为 $X : Y : Z = 95.017 : 100.000 : 108.813$, 将 $R = 1, G = 1, B = 1$ 和 D_{65} 的三刺激值代入式(2)可以得到 C_r, C_g 和 C_b .

设电子显示色系的红绿蓝三原色是 $(R_e), (G_e), (B_e)$, 它们在 $[XYZ]$ 色系中的色度坐标分别为: $x_{re}, y_{re}, z_{re}; x_{ge}, y_{ge}, z_{ge}; x_{be}, y_{be}, z_{be}$, 根据式(1)求得由电子显示色系 $[R_e G_e B_e]$ 向 $[XYZ]$ 色系转换的方程为

$$\begin{aligned} X &= C_{re} x_{re} R_e + C_{ge} x_{ge} G_e + C_{be} x_{be} B_e = \\ & a_{re} R_e + a_{ge} G_e + a_{be} B_e \\ Y &= C_{re} y_{re} R_e + C_{ge} y_{ge} G_e + C_{be} y_{be} B_e = \\ & b_{re} R_e + b_{ge} G_e + b_{be} B_e \\ Z &= C_{re} z_{re} R_e + C_{ge} z_{ge} G_e + C_{be} z_{be} B_e = \\ & c_{re} R_e + c_{ge} G_e + c_{be} B_e \end{aligned} \quad (4)$$

由全息原理知, 计算全息的三原色必须是光谱色, 可选取电子显示色系三原色的主波长 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 对应的光谱色为彩色计算全息的三原色, 如图 1.

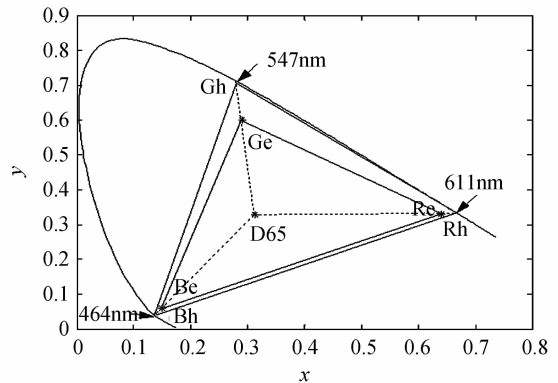


图 1 电子显示色系(PAL-RGB 色系)的三原色及其主波长
Fig. 1 Three primary colors of PAL and its main wavelengths

设波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 的光谱色在 $[XYZ]$ 色系中的色度坐标为: $x_{rh}, y_{rh}, z_{rh}; x_{gh}, y_{gh}, z_{gh}; x_{bh}, y_{bh}, z_{bh}$, 由式(2)即可得到由 $[XYZ]$ 色系向 $[R_h G_h B_h]$ 色系转化的方程为

$$\begin{aligned} R_h &= \frac{y_{gh} z_{bh} - y_{bh} z_{gh}}{C_{rh} \Delta_h} X + \frac{x_{bh} z_{gh} - x_{gh} z_{bh}}{C_{rh} \Delta_h} Y + \\ & \frac{x_{gh} y_{bh} - x_{bh} y_{gh}}{C_{rh} \Delta_h} Z = \alpha_{rh} X + \alpha_{yh} Y + \alpha_{zh} Z \\ G_h &= \frac{y_{bh} z_{rh} - y_{rh} z_{bh}}{C_{gh} \Delta_h} X + \frac{x_{rh} z_{bh} - x_{bh} z_{rh}}{C_{gh} \Delta_h} Y + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{x_{bh}y_{rh}-x_{rh}y_{bh}}{C_{gh}\Delta_h}Z &= \beta_{rh}X + \beta_{yh}Y + \beta_{zh}Z \\ B_h &= \frac{y_{rh}z_{gh}-y_{gh}z_{rh}}{C_{bh}\Delta_h}X + \frac{x_{gh}z_{rh}-x_{rh}z_{gh}}{C_{bh}\Delta_h}Y + \\ & \frac{x_{rh}y_{gh}-x_{gh}y_{rh}}{C_{bh}\Delta_h}Z = \gamma_{rh}X + \gamma_{yh}Y + \gamma_{zh}Z \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)即可得到电子显示色系下颜色量和彩色计算全息色系下颜色量之间的关系为

$$\begin{aligned} R_h &= a_r R_e + a_g G_e + a_b B_e \\ G_h &= b_r R_e + b_g G_e + b_b B_e \\ B_h &= c_r R_e + c_g G_e + c_b B_e \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} a_r &= \alpha_{rh}a_{re} + \alpha_{yh}b_{re} + \alpha_{zh}c_{re} \quad a_g = \alpha_{rh}a_{ge} + \alpha_{yh}b_{ge} + \\ & \alpha_{zh}c_{ge} \quad a_b = \alpha_{rh}a_{be} + \alpha_{yh}b_{be} + \alpha_{zh}c_{be} \\ b_r &= \beta_{rh}a_{re} + \beta_{yh}b_{re} + \beta_{zh}c_{re} \quad b_g = \beta_{rh}a_{ge} + \beta_{yh}b_{ge} + \\ & \beta_{zh}c_{ge} \quad b_b = \beta_{rh}a_{be} + \beta_{yh}b_{be} + \beta_{zh}c_{be} \\ c_r &= \gamma_{rh}a_{re} + \gamma_{yh}b_{re} + \gamma_{zh}c_{re} \quad c_g = \gamma_{rh}a_{ge} + \gamma_{yh}b_{ge} + \\ & \gamma_{zh}c_{ge} \quad c_b = \gamma_{rh}a_{be} + \gamma_{yh}b_{be} + \gamma_{zh}c_{be} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)即可将彩色电子显示色系下的颜色量 R_e, G_e, B_e 转化成彩色计算全息色系下的颜色量 R_h, G_h, B_h .

2 彩色计算全息物光波振幅与颜色量的关系

计算全息图形成过程本质上是一个数字化的物理过程,在计算全息时所涉及的与光有关的物理量必须是振幅或复振幅,设颜色 C 在 $[R_h, G_h, B_h]$ 色系下的颜色量是 R_h, G_h, B_h , 与之对应的物光波振幅为

$$A_{oCr} = a_{wr} \sqrt{R_h} A_{oCg} = a_{wg} \sqrt{G_h} A_{oCb} = a_{wb} \sqrt{B_h} \quad (8)$$

式中 a_{wr}, a_{wg}, a_{wb} 是匹配系数,为了使得当 $R_h = G_h = B_h = 1$ 时, $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 决定的三原色物光波也能匹配成白光,则要求其振幅比例为

$$A_{owr} : A_{owg} : A_{owb} = a_{wr} : a_{wg} : a_{wb} \quad (9)$$

设全息再现时光谱不展宽,彩色全息图显色是通过照明光源中波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 的三个光谱色合成的,设照明光源中波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 的光谱相对功率为 $P(\lambda_r), P(\lambda_g), P(\lambda_b)$,在线性编码条件下,全息再现像振幅正比于物光波的振幅

$$\begin{aligned} A_{iCr} &= \eta A_{oCr} \sqrt{P(\lambda_r)} = \eta \sqrt{P(\lambda_r)} a_{wr} \sqrt{R_h} \\ A_{iCg} &= \eta A_{oCg} \sqrt{P(\lambda_g)} = \eta \sqrt{P(\lambda_g)} a_{wg} \sqrt{G_h} \end{aligned} \quad (10)$$

$$A_{iCb} = \eta A_{oCb} \sqrt{P(\lambda_b)} = \eta \sqrt{P(\lambda_b)} a_{wb} \sqrt{B_h}$$

η 是全息图的衍射效率,若是匹配成白光则要求

$$\begin{aligned} A_{iwr} &= \eta \sqrt{P(\lambda_r)} a_{wr} \\ A_{iwg} &= \eta \sqrt{P(\lambda_g)} a_{wg} \\ A_{iwb} &= \eta \sqrt{P(\lambda_b)} a_{wb} \end{aligned} \quad (11)$$

物光波振幅 $A_{iwr}, A_{iwg}, A_{iwb}$ 由匹配成何种白光决定,物光波振幅对应的亮度为

$$\begin{aligned} Y_r &= V(\lambda_r) \eta^2 P(\lambda_r) a_{wr}^2 \\ Y_g &= V(\lambda_g) \eta^2 P(\lambda_g) a_{wg}^2 \\ Y_b &= V(\lambda_b) \eta^2 P(\lambda_b) a_{wb}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $V(\lambda_r), V(\lambda_g), V(\lambda_b)$ 分别是视见度函数 $V(\lambda)$ 在波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 处的函数值,则匹配系数 a_{wr}, a_{wg}, a_{wb} 应满足

$$\begin{aligned} a_{wr} : a_{wg} : a_{wb} &= \sqrt{\frac{Y_r}{P(\lambda_r)V(\lambda_r)}} : \sqrt{\frac{Y_g}{P(\lambda_g)V(\lambda_g)}} : \\ & \sqrt{\frac{Y_b}{P(\lambda_b)V(\lambda_b)}} \end{aligned} \quad (13)$$

当所需匹配的白光类型确定的情况下,亮度 Y_r, Y_g, Y_b 也是确定的,设波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 的三个光谱色在 1931 CIE-XYZ 色系中的色度坐标为 $x_{rh}, y_{rh}, z_{rh}; x_{gh}, y_{gh}, z_{gh}; x_{bh}, y_{bh}, z_{bh}$, 则三原色再现像的三刺激值分别为

$$\begin{aligned} X_r &= \frac{x_{rh}}{y_{rh}} Y_r, Y_r = Y_r, Z_r = \frac{z_{rh}}{y_{rh}} Y_r \\ X_g &= \frac{x_{gh}}{y_{gh}} Y_g, Y_g = Y_g, Z_g = \frac{z_{gh}}{y_{gh}} Y_g \\ X_b &= \frac{x_{bh}}{y_{bh}} Y_b, Y_b = Y_b, Z_b = \frac{z_{bh}}{y_{bh}} Y_b \end{aligned} \quad (14)$$

若所需匹配的白光颜色量为 X_w, Y_w, Z_w , 则有

$$\begin{aligned} X_w &= \frac{x_{rh}}{y_{rh}} Y_r + \frac{x_{gh}}{y_{gh}} Y_g + \frac{x_{bh}}{y_{bh}} Y_b = a_1 Y_r + \\ & a_2 Y_g + a_3 Y_b \\ Y_w &= Y_r + Y_g + Y_b \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Z_w &= \frac{z_{rh}}{y_{rh}} Y_r + \frac{z_{gh}}{y_{gh}} Y_g + \frac{z_{bh}}{y_{bh}} Y_b = c_1 Y_r + \\ & c_2 Y_g + c_3 Y_b \end{aligned}$$

解式(15)得到亮度 Y_r, Y_g, Y_b 应该满足

$$\begin{aligned} Y_r &= \frac{(c_3 - c_2)}{\Omega} X_c + \frac{(c_2 a_3 - a_2 c_3)}{\Omega} Y_c + \frac{(a_2 - a_3)}{\Omega} Z_c \\ Y_g &= \frac{(c_1 - c_3)}{\Omega} X_c + \frac{(a_1 c_3 - c_1 a_3)}{\Omega} Y_c + \frac{(a_3 - a_1)}{\Omega} Z_c \\ Y_b &= \frac{(c_2 - c_1)}{\Omega} X_c + \frac{(c_1 a_2 - a_1 c_2)}{\Omega} Y_c + \frac{(a_1 - a_2)}{\Omega} Z_c \\ \Omega &= (c_2 - c_1)(a_3 - a_1) - (a_2 - a_1)(c_3 - c_1) \end{aligned} \quad (16)$$

系数 $a_1, a_2, a_3; c_1, c_2, c_3$ 为

$$\begin{aligned} a_1 &= x_{rh}/y_{rh}, a_2 = x_{gh}/y_{gh}, a_3 = x_{bh}/y_{bh} \\ c_1 &= z_{rh}/y_{rh}, c_2 = z_{gh}/y_{gh}, c_3 = z_{bh}/y_{bh} \end{aligned} \quad (17)$$

式(13)就是在功率谱分布为 $P(\lambda)$ 的光源照明下,以波长为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 的光谱色为三原色的色系中,匹配成颜色量为 X_w, Y_w, Z_w 的白光所需三原色光的振幅比,进而由式(8)确定彩色计算全息三原色物光波的振幅.

3 彩色计算全息实验及结果分析

以 PAL-RGB 色系下的一彩色目标为计算全息的物体,如图 2,选择 PAL-RGB 色系三原色的主波长为彩色计算全息色系的三个计算波长,并假设以 CIE 标准照明体 D_{65} 为参考白,则彩色计算全息颜色传递的各参量如表 1.

在 PAL-RGB 色系下,规定当匹配成 D_{65} 白光时, $R_e = G_e = B_e = 1$,在彩色计算全息色系中,也同样规定再现像匹配成 D_{65} 白光时, $R_h = G_h = B_h = 1$.按照此规定,结合表 1 给出的相关参量及第二节内

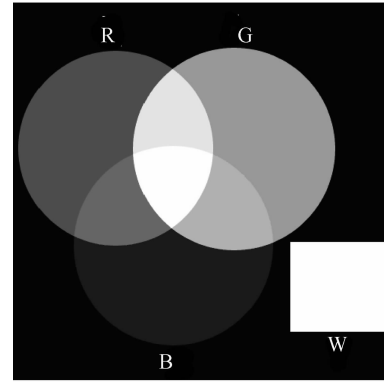


图 2 计算全息彩色物体
Fig. 2 Color object of CCGH

表 1 $[R_e G_e B_e]$ 和 $[R_h G_h B_h]$ 色系间颜色量传递的主要参量

Table 1 The related color matching parameters of CCGH

$[R_e G_e B_e]$									$[R_h G_h B_h]$								
$[R_e]$			$[G_e]$			$[B_e]$			$[R_h]$			$[G_h]$			$[B_h]$		
x_{re}	y_{re}	z_{re}	x_{ge}	y_{ge}	z_{ge}	x_{be}	y_{be}	z_{ve}	x_{rh}	y_{rh}	z_{rh}	x_{gh}	y_{gh}	z_{gh}	x_{bh}	y_{bh}	z_{ve}
0.64	0.33	0.03	0.29	0.60	0.11	0.15	0.06	0.79	0.67	0.33	0	0.28	0.71	0.01	0.14	0.04	0.83
Wavelength/nm									Calculated wavelength/nm								
611			547			464			611			547			464		
Color quantity: $X_w = 95.017; Y_w = 100; Z_w = 108.813$																	

容,即可得到颜色量 R_v, G_e, B_e 向 R_h, G_h, B_h 转化的传递方程为

$$\begin{aligned} R_h &= 0.8587R_e + 0.1144G_e + 0.0271B_e \\ G_h &= 0.017R_e + 0.9516G_e + 0.0313B_e \\ B_h &= 0.0185R_e + 0.1129G_e + 0.8688B_e \end{aligned} \quad (18)$$

选择计算机彩色彩虹全息图算法对物光波振幅进行全息编码^[7,14],彩虹全息狭缝宽度设置为 3 mm,观察距离为 300 mm,参考光入射角为 10.5° 其它参量见表 2.设定再现光为溴钨灯,实测溴钨灯

光源在波长 611 nm, 547 nm 和 464 nm 处的相对功率为: $P(\lambda_r) = 1, P(\lambda_g) = 0.596, P(\lambda_b) = 0.226$. 采用自行研发的计算机全息图直写系统^[15],将通过计算机编码得到的数字化彩色彩虹全息图输出在全息记录介质上,经过后处理即得到可白光再现的彩虹全息图.用彩色 CCD 相机(Canon EOS 450D)(镜头前加狭缝光阑)拍摄了全息图再现像,从三个角度设计实验以证明颜色匹配的正确性.

表 2 彩色物体的颜色量及其对应的物光波振幅

Table 2 Color quantity and amplitude of object light field

Color Region	$R_e G_e B_e$			$R_h G_h B_h$			$A_{ocr}, A_{ocg}, A_{ocb}$		
Red	1	0	0	0.8587	0.0170	0.0185	1	0.2190	0.3641
Green	0	1	0	0.1144	0.9516	0.1129	0.2228	1	0.5491
Blue	0	0	1	0.0271	0.0313	0.8688	0.0712	0.1191	1
Yellow	1	1	0	0.9731	0.9686	0.1314	0.6440	1	0.5871
Cyan	0	1	1	0.1415	0.9829	0.9817	0.1530	0.6277	1
Magenta	1	0	1	0.8858	0.0483	0.8873	0.4027	0.1464	1
White	1	1	1	1	1	1	0.4031	0.6272	1

1) 不考虑匹配问题,即令 $A_{ocr} = \sqrt{R_e}, A_{ocg} = \sqrt{G_e}, A_{ocb} = \sqrt{B_e}$ 直接计算全息图,当利用所设计的溴钨灯照明再现时,得到图 3(a)的再现像;

2) 严格按照式(8)进行匹配,根据式(13)求出 $a_{wr} : a_{wg} : a_{wb} = 0.4031 : 0.6272 : 1$,再现光为所设计的溴钨灯,得到 3(b)的再现像;

3) 第 2)种情况下,不用所设计的溴钨灯再现,而采用 LED 白光,其在三个计算波长 611 nm,

547 nm 和 464 nm 处的相对功率为: $P(\lambda_r) = 0.707, P(\lambda_g) = 0.608, P(\lambda_b) = 1$ 得到图 3(c)的再现像.

考察三个再现像,每一个都能够再现物体的主色调,单独观察每一个再现像,由于颜色视觉的恒常性,很难判断哪一个再现像最好,但是当同时观察三个再现像时,就会有明显的差异.与原物体颜色(图 2)比较,图 3(a)偏红.因为溴钨灯的色光偏暖,即长波长的光相对功率比较大,而计算时没有对此进行

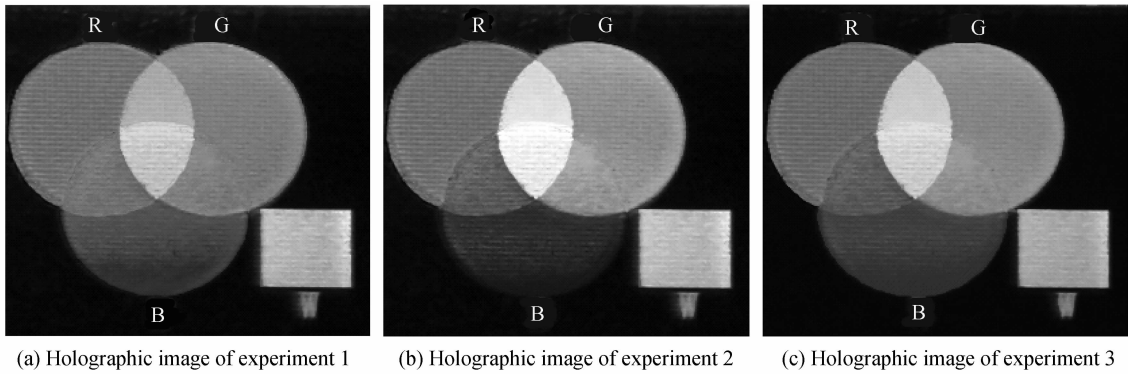


图 3 计算全息图再现像
Fig. 3 Holographic images of CCGH

补偿. 图3(c)偏蓝,虽然全息图的计算是严格进行了颜色匹配,但再现光 LED 的光谱是偏冷的,或者说相对功率在短波长区域较大.

图 3(b)是正确再现结果,和另外两个再现像比较,更接近原物体颜色,说明本文所述彩色计算全息颜色信息的传递方法是有效的. 然而,彩色全息再现像的色饱和度仍有所下降,导致这一现象主要原因是再现光的三原色光谱展宽造成的. 彩色彩虹全息再现原理如图 4,在彩色彩虹全息图中,实际上有三个单色彩虹全息图,在白光照明的时候,每一个单色全息图将在眼睛观察位置形成水平条状彩虹光谱分布,三个彩虹图相对有一位移,三个彩虹光分布展开如图 5 所示,图示中虚线框内的部分是重合的,重合的位置就是人眼观察再现像的位置. 虚框内的光就是实际进入人眼的三原色光,每一个颜色由虚框内的光谱色合成,理论上要求进入眼睛的光谱色应该正好是 611 nm,547 nm 和 464 nm 三个单色光的颜色,但是由于瞳孔(或者照相镜头孔径)具有的大小,三原色光谱就发生了展宽. 很明显,全息图衍射的彩虹光谱空间分布越宽,进入瞳孔或者照相镜头孔径的光谱宽度就越窄,或者越接近 611 nm,547 nm 和 464 nm 三个单色光. 彩虹光谱空间分布与彩虹全息图的空间频率有密切关系,当全息图空间频率增大时,各彩虹光谱在空间分离得越明显,能够进入人眼的光谱带宽也就越窄,因而全息再现像的色饱和度也将提高.

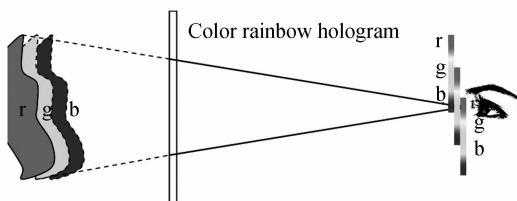


图 4 彩色彩虹全息再现原理
Fig. 4 Reconstruction principle of color rainbow hologram



图 5 三个彩虹狭缝像光分布展开
Fig. 5 Expanding diagrams of the three rainbow spectrums

全息图的空间频率与参考光入射角的设置有关,入射角越大,空间频率越大. 当计算全息图的大小一定时,全息图的空间频率提高意味着计算量的增大,同时也给全息图的缩微输出提出更高的要求. 我们利用自行设计的计算全息图直写系统缩微输出全息图,其图像输出分辨率目前最高只能达到 800 线对/mm,和普通的光学全息图空间频率一般可以达到 1 500 线对/mm 相比,还有一定的距离.

4 结论

本文基于颜色匹配理论,研究了电子显示颜色系统和彩色计算全息颜色系统之间的关系,同时讨论了颜色量和物光波振幅之间所应满足的一般关系. 在此基础上,选取电子显示色系下的一彩色目标为全息图计算物体,以计算机制彩色彩虹全息术算法对物体的物光波信息进行编码,并结合自行研发的计算全息图直写系统制作了可实际光学再现的彩虹全息图,彩色全息再现像达到了较为令人满意的效果. 彩色计算全息显示的实用化研究道路才刚刚起步,该文的研究工作将为彩色计算全息三维显示的实用化奠定一定的理论基础. 作为一项应用技术,还有很多值得探究的实际问题,在接下来的工作中,将结合全息图制作的实际条件进一步深入探究彩色计算全息的颜色传递问题,力争更进一步有效地提高彩色全息图颜色的再现质量.

参考文献

[1] WANG Hui, LI Yong, JIN Hon-zhen. Three-dimensional visualization of shape measurement data based on a computer generated hologram[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(5): S195-S199.

- [2] DALLAS W J, LOHMANN A W. Holography, techniques: computer-generated holograms, in encyclopedia of modern optics[M]. Netherlands; Elsevier, 2005: 72-79.
- [3] KIM Y S, KIM T, POON T C, *et al.* Three-dimensional display of a horizontal-parallax-only hologram[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(7): B81-B87.
- [4] CHEN R H Y, WILKINSON T D. Computer generated hologram from point cloud using graphics processor [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(36): 6841-6850.
- [5] BLANCHE P A, BABLUMIAN A, VOORAKARANAM R, *et al.* Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, **468**(7320): 80-83.
- [6] SHIMOBABA T, ITO T, MASUDA N. Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(10): 9955-9966.
- [7] SHI Yi-le, WANG Hui, LI Yong, *et al.* Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(21): 4219-4226.
- [8] BAI Xiao-hui, WANG Lin, REN Ya-ping, *et al.* Reflection holography for three-dimensional display based on computer-generated holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 591-595.
拜晓慧, 万琳, 任亚萍, 等. 利用反射全息实现计算全息三维显示 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 591-595.
- [9] WESSKAMP B, JENDRAL A, BRYNGDAHL O. Hybrid color holograms[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(22): 1863-1865.
- [10] JIAO Shu-lan, JIN Qi-cheng, ZHANG Wu-tian. Color constancy under changing phases of daylight [J]. *Acta Psychologica Sinica*, 1984, **16**(1): 55-64.
焦书兰, 荆其诚, 张武田. 不同时相日光下颜色的恒常性 [J]. *心理学报*, 1984, **16**(1): 55-64.
- [11] ZHANG Tao, SANG He-lin, ZENG Hua. Transformation of different color system in computer color match[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **14**(1): 94-96.
张韬, 尚鹤龄, 曾华. 电脑配色系统中的颜色体系相互转换 [J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 94-96.
- [12] 俞斯乐, 侯正信, 冯启明, 等. 电视原理[M]. 5版. 北京: 国防工业出版社, 2000: 85-150.
- [13] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 272-292.
- [14] WANG Hui, LI Yong, JIN Hong-zhen, *et al.* A new method for computer-generated rainbow 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.
- [15] JIN Hong-zhen, LI Yong, WANG Hui, *et al.* The design of auto-microcopy system for digital holograms [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(3): 233-236.
金洪震, 李勇, 王辉, 等. 数字全息图微缩输出系统设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(3): 233-236.

• 下期预告 •

基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计

俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 包佳祺, 尹娟娟

(华中科技大学 文华学院, 武汉 430074)

摘要:根据薄膜窄带滤光片在斜入射时的偏振特性,提出了基于遗传算法的斜入射薄膜窄带滤光片膜系优化设计方法.根据开发的程序,设计并制备了一组可用于 18° 倾斜入射的0.8纳米信道间隔的五腔薄膜窄带滤光片.该滤光片能有效地抑制斜入射时偏振光中心波长的分离现象,降低器件的偏振相关损耗,通过角度调谐能实现选择波长的改变.通过与针法设计的滤光片膜系相比,遗传算法得到的膜系具有更高的矩形度、更大的波长调谐范围以及更低的偏振相关损耗.实验结果表明其满足设计要求并有超过25纳米的波长调谐范围.

关键词:薄膜;窄带滤光片;遗传算法;斜入射;优化设计