

## 广色域多基色显示系统的驱动图像生成方法

李亚生<sup>1</sup>, 廖宁放<sup>1\*</sup>, 李玉梅<sup>1</sup>, 李松霖<sup>2</sup>, 吴文敏<sup>1</sup>, 范秋梅<sup>1</sup><sup>1</sup>北京理工大学颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081;<sup>2</sup>利亚德光电股份有限公司, 北京 100091

**摘要** 多基色显示是广色域显示技术的重要发展方向,但多基色显示系统目前面临着高分辨率、高帧率多基色驱动图像的获取问题。提出一种基于广色域 RGB 相机的多基色驱动图像生成方法。以实际多基色 LED 点阵显示系统为例,首先建立了显示系统的  $n$  基色空间与标准 CIE XYZ 空间的转换模型,即正向转换模型;在正向模型的基础上,建立了由 3 基色空间到多基色空间的逆向转换模型,从而将 RGB 相机摄取的高分辨率彩色图像转换为  $n$  基色显示系统的驱动图像。实验中,根据典型 5 基色 LED 点阵显示器的色度参数分别建立了正向和逆向转换模型,并将 ColorChecker SG 色卡的广色域图像作为目标图像,完成了基色转换和色差分析。

**关键词** 视觉光学; 多基色显示; 广色域显示; LED 显示器; 多光谱成像

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221132

## 1 引言

广色域显示器是近年来彩色显示技术领域的重要发展方向。传统的彩色显示系统的颜色标准主要以 sRGB 标准为代表,其色域三角形的范围非常有限,因此难以满足众多新兴图像显示领域的需求。为此,相关国际机构陆续推出了一系列具有更广色域的显示系统标准,包括 AdobeRGB、DCI-P3、Rec. 2020 等;但是这些新的广色域显示系统标准的色域范围仍然局限于某个三角形,难以覆盖更广的颜色空间。为了进一步增大彩色显示器的色域范围,人们开始研究多基色显示系统<sup>[1-18]</sup>,其中包括 4 基色<sup>[6,8-9]</sup>、5 基色<sup>[6,12]</sup>、6 基色<sup>[6,18]</sup>。传统的多基色显示技术大都采用 LED 背光 LCD 面板<sup>[3,5,8-9,11-12]</sup>,此外量子点薄膜<sup>[4-5]</sup>、量子点发光 LED (QLEDs)<sup>[2]</sup>、有机/聚合物发光二极管 (OLEDs/PLEDs)<sup>[6]</sup>等新技术也得到大力发展。在多基色显示系统的基础理论方面,大量的工作聚焦于多基色空间与 CIE 标准色度空间的转换模型研究<sup>[1-2,14-16]</sup>。

本课题组近年来致力于一种新型多基色 LED 点阵显示系统的研究,该系统具有大尺寸、大亮度范围、广色域等特点,符合目前彩色图像显示领域的发展方向。多基色 LED 点阵显示器的关键技术之一是产生具有  $n$  个基色的高分辨驱动图像。众所周知,传统的多光谱相机很难以快照方式摄取高分辨率的多

基色图像,而现有的 3 基色 RGB 彩色相机大都具有高分辨率、快照成像等特点,为此尝试采用高分辨率 RGB 相机来生成多基色显示系统的驱动图像。根据现有的典型多基色 LED 点阵显示器的色度参数,并结合色度学理论,建立了  $n$  基色图像空间与 CIE 标准 XYZ 空间的转换模型,包括正向转换模型和逆向转换模型,并解决了由 3 基色空间到多基色空间转换所遇到的同色异谱问题,从而初步实现了将 RGB 相机采集的高分辨率彩色图像转换为  $n$  基色显示系统的驱动图像。通过实验验证了所提出方法的有效性,并分析了现有转换模型存在的问题。

## 2 多基色显示系统

目前研究的 6 基色 LED 点阵显示系统(图 1)包括目标、RGB 相机、颜色转换模型、6 基色驱动图像、LED 点阵显示屏。其中,LED 点阵显示屏由  $m$  行和  $n$  列像素组成;每一个像素包含 6 个子像素,这些子像素中的 LED 由 6 种窄带 LED 组成,它们的中心波长或主波长按照一定规律排列以获得理想的色域范围;在图像显示过程中,每一个像素作为一个图像单元,它所呈现的颜色由 6 个子像素的色光混合而成,理论上服从三刺激值叠加原理。因此,为了实现目标图像的标准化颜色再现,需要将目标的 RGB 图像转换为 6 个基色( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ )的驱动图像。

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61975012)

通信作者: \*liaonf@bit.edu.cn

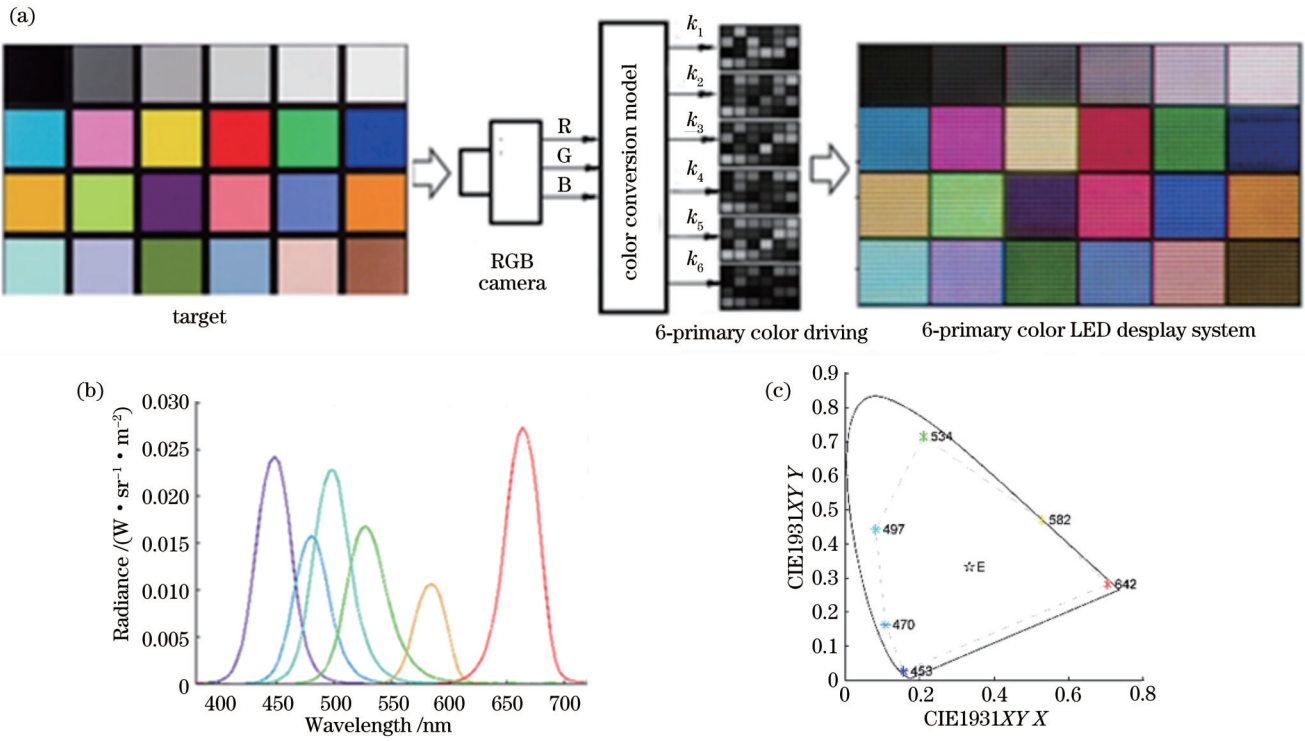


图 1 一种 6 基色 LED 点阵显示系统。(a) 系统组成; (b) 6 基色 LED 光谱辐射分布; (c) 6 基色 CIE1931 色品坐标  
 Fig. 1 System of 6-primary color LED display. (a) Configuration of system; (b) spectrum of 6-primary-color LED; (c) CIE1931 chromaticities of 6-primary LED

### 3 广色域 RGB 相机

现有研究表明,目前大多数的商业相机在硬件层面的颜色获取能力都是可以胜任广色域成像工作的<sup>[19]</sup>。为此,分别测量了 Canon 1000D、Fuji X-E3、Nikon J1、Sony F828 这 4 种典型的数码相机的 RGB 通道的光谱灵敏度曲线。测量过程中,设定单色仪的光谱范围为 430~650 nm,波长间隔为 10 nm;相机的输出图像采用 Raw 格式,相机的白场色度设置 CIE 标准照明体 E,即等能白。只考虑相机硬件对其颜色获取能力的影响,将 4 个相机对单色光响应所得的 Raw 数据(RGB)以平面坐标( $r, g$ )的形式绘制在坐标图上,如图 2 所示,其中:

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R + G + B} \\ g = \frac{G}{R + G + B} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $R, G, B$ 分别表示相机三个通道的响应值。从图 2 中可以看出,Canon 1000D 在 4 种相机中颜色区分能力最强,其次是 Fuji X-E3。本文采用了 Canon 1000D 相机进行实验。

### 4 多基色转换模型

假设  $n$  基色显示屏的颜色合成过程满足三刺激值叠加原理,则可以建立由  $n$  基色的颜色刺激值空间( $k_1,$

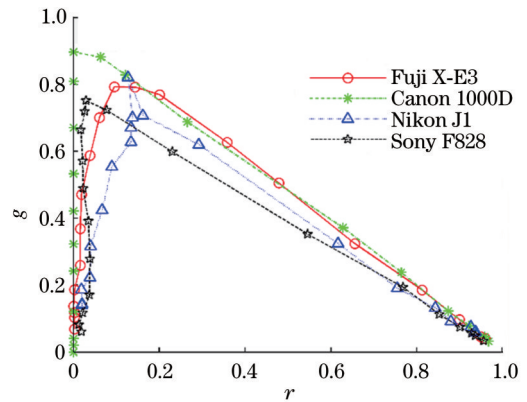


图 2 典型 RGB 相机的颜色获取能力测试结果  
 Fig. 2 Test results of color acquiring ability of typical RGB cameras

$k_2, k_3, \dots, k_n$ )到 CIE1931 XYZ 三刺激值空间( $X, Y, Z$ )的转换模型,称之为正向转换模型;在此基础上可以导出由( $X, Y, Z$ )到( $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ )的转换模型,即逆向转换模型。在建立正向模型之前,需要分析显示设备各通道的独立性<sup>[20]</sup>。LED 点阵显示器由于其各通道独立驱动且发光点互相分隔,在原理上具有较高的通道独立性<sup>[21]</sup>。以目前研究的一个 6 基色 LED 点阵显示系统为例,为了验证其独立性,用光谱辐亮度计 PR715 测量了各个通道在特定驱动值下单独驱动和组合驱动时的光谱辐亮度,如图 3 所示;将各通道单独点亮时测得的曲线在数值上做加法,结果如图 3(b)虚线

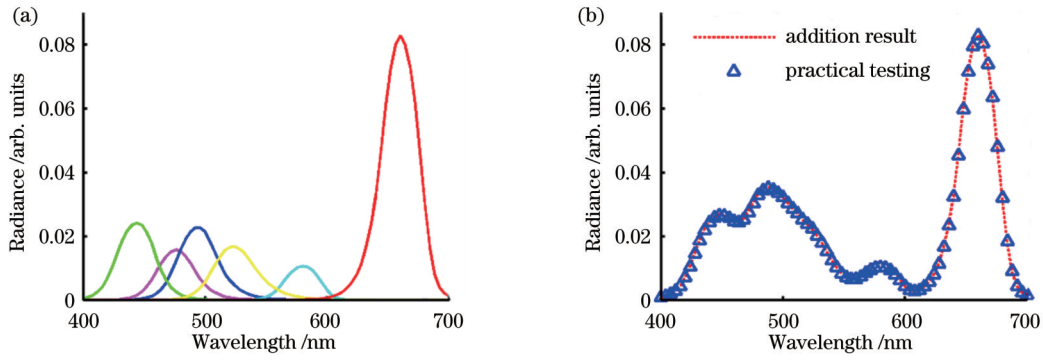


图 3 通道独立性测试结果。(a)各通道光谱辐亮度;(b)各通道光谱辐亮度叠加结果与同时点亮的实测结果

Fig. 3 Test results of channel independence. (a) Spectral radiance of each channel; (b) addition result and practical testing result of spectral radiance of all channels

所示,且将全部通道同时点亮的测量结果标注在图 3 (b)中,可见该 LED 点阵显示系统具有较好的通道独立性,满足三刺激值叠加原理。

#### 4.1 正向转换模型

根据格拉斯曼定律,在通道独立性的基础上,多基色显示的颜色结果是各个基色色度的叠加,以  $n$  基色显示系统为例,设  $[P_1], [P_2], \dots, [P_n]$  代表各个基色混色时的单位,  $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$  为各个基色混色时的数量,则混色结果为

$$P[P] = k_1[P_1] + k_2[P_2] + \dots + k_n[P_n], \quad (2)$$

其中各个基色的单位以按照某种原则匹配出等能白 E 光源来确定,即当  $k_1 = k_2 = \dots = k_n = 1$  时,混色结果为等能白光  $P_E$ :

$$[P_E] = [P_1] + [P_2] + \dots + [P_n]. \quad (3)$$

用 CIE1931 XYZ 色度系统来表示式(2)所述的混色过程,设第  $n$  个基色通道产生的颜色的单位三刺激值  $[P_n]$  为  $(X_n, Y_n, Z_n)$ ,它对应的色品坐标为  $(x_n, y_n, z_n)$ ,则有

$$\begin{cases} x_n = \frac{X_n}{X_n + Y_n + Z_n} \\ y_n = \frac{Y_n}{X_n + Y_n + Z_n} \\ z_n = \frac{Z_n}{X_n + Y_n + Z_n} \end{cases} \quad (4)$$

根据三刺激值的叠加原理,正向转换模型可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & \dots & Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$  为各通道驱动值。正向转换矩阵可表示为

$$C = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & \dots & Z_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

为了确定转换矩阵  $C$ , 根据  $(x_n, y_n, z_n)$  与  $(X_n, Y_n, Z_n)$  的关系, 则有

$$C = \begin{bmatrix} c_1 x_1 & c_2 x_2 & c_3 x_3 & \dots & c_n x_n \\ c_1 y_1 & c_2 y_2 & c_3 y_3 & \dots & c_n y_n \\ c_1 z_1 & c_2 z_2 & c_3 z_3 & \dots & c_n z_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

因此,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 x_1 & c_2 x_2 & c_3 x_3 & \dots & c_n x_n \\ c_1 y_1 & c_2 y_2 & c_3 y_3 & \dots & c_n y_n \\ c_1 z_1 & c_2 z_2 & c_3 z_3 & \dots & c_n z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: 待定常数  $c_1 = X_1 + Y_1 + Z_1, c_2 = X_2 + Y_2 + Z_2, \dots, c_n = X_n + Y_n + Z_n$ , 需要通过求解式(8)来确定。

为此,引入多基色显示系统的白平衡条件。设系统白场采用 CIE 标准照明体的等能白,即 E 照明体,则可以得到求解方程的条件  $k_1 = k_2 = \dots = k_n = 1$  且  $X = Y = Z = 1$ ; 将这些条件代入式(8), 得到

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 x_1 & c_2 x_2 & c_3 x_3 & \dots & c_n x_n \\ c_1 y_1 & c_2 y_2 & c_3 y_3 & \dots & c_n y_n \\ c_1 z_1 & c_2 z_2 & c_3 z_3 & \dots & c_n z_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

因此,当基色数量  $n=3$  时,可以直接由式(9)求解 3 个系数  $c_1, c_2, c_3$ ; 但是,当基色数量  $n>3$  时,不能直接求出  $n$  个系数  $c_1, c_2, \dots, c_n$ 。为此,针对典型 4 通道、5 通道和 6 通道系统,提出如图 4(a)~(c) 所示的建模策略。将各个通道按照中心波长从短到长排列; 对于 4 基色系统,采用通道(1,2,4)和(1,3,4)的组合策略; 对于 5 基色系统,采用通道(1,3,5)和(2,4,5)的组合策略; 对于 6 基色系统,采用通道(1,3,6)、(2,4,6)和(2,5,6)的组合策略。建模策略的设定依照以下原则: 一是每个三角形都要包含白场坐标; 二是依据各基色的色品坐标位置赋予其权重,坐标独立性强的通道组合时使用次数更多。

对于 4 基色系统,参照图 4(a) 的策略,在式(9)的基础上,分别建立两组三刺激值:



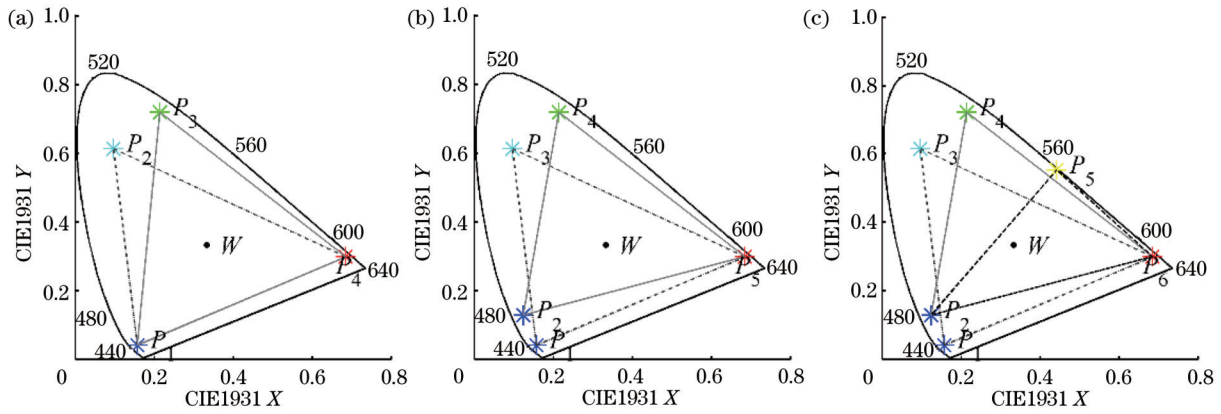


图 4 基色转换模型的建模策略,其中  $P_1 \sim P_6$  表示各个基色,  $W$  表示白场。(a) 4 基色系统; (b) 5 基色系统; (c) 6 基色系统  
Fig. 4 Modeling strategy for primary color conversion models, with  $P_1 \sim P_6$  representing primaries and  $W$  representing white point. (a) 4-primary color system; (b) 5-primary color system; (c) 6-primary color system

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}x_1 & c_{21}x_2 & c_{41}x_4 \\ c_{11}y_1 & c_{21}y_2 & c_{41}y_4 \\ c_{11}z_1 & c_{21}z_2 & c_{41}z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_4 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12}x_1 & c_{33}x_3 & c_{42}x_4 \\ c_{12}y_1 & c_{33}y_3 & c_{42}y_4 \\ c_{12}z_1 & c_{33}z_3 & c_{42}z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $c_1, c_4$  分别为两个分组各自的系数,  $c_1 = c_{11} + c_{12}$ ,  $c_4 = c_{41} + c_{42}$ 。对于式(10)和(11)这两个方程,分别代入白平衡条件  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1, X = Y = Z = 1$ , 可以解出  $c_{11}, c_{21}, c_{41}$  和  $c_{12}, c_{33}, c_{42}$ , 最后将 2 个方程合并为 1 个方程:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} c_1x_1 & c_2x_2 & c_3x_3 & c_4x_4 \\ c_1y_1 & c_2y_2 & c_3y_3 & c_4y_4 \\ c_1z_1 & c_2z_2 & c_3z_3 & c_4z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式(12)就是希望得到的 4 基色系统的正向转换模型, 其中的  $k_1, k_2, k_3, k_4$  可以看作 4 幅基色图像的驱动值。

对于 5 基色系统, 参照图 4(b) 的策略, 可以求出正向转换模型:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} c_1x_1 & c_2x_2 & c_3x_3 & c_4x_4 & c_5x_5 \\ c_1y_1 & c_2y_2 & c_3y_3 & c_4y_4 & c_5y_5 \\ c_1z_1 & c_2z_2 & c_3z_3 & c_4z_4 & c_5z_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

对于 6 基色系统, 参照图 4(c) 的策略, 可以求出正向转换模型:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} c_1x_1 & c_2x_2 & c_3x_3 & c_4x_4 & c_5x_5 & c_6x_6 \\ c_1y_1 & c_2y_2 & c_3y_3 & c_4y_4 & c_5y_5 & c_6y_6 \\ c_1z_1 & c_2z_2 & c_3z_3 & c_4z_4 & c_5z_5 & c_6z_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

#### 4.2 逆向转换模型

在实际应用中, 首先将广色域彩色相机的 RGB 图

像数据转换为 CIE 标准的 XYZ 图像数据, 然后将 XYZ 图像数据转换为多基色驱动图像数据 ( $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ ), 因此需要建立逆向转换模型:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中:  $B$  是一个  $n \times 3$  的矩阵。当  $n=3$  时, 式(6)中  $C$  是一个方阵,  $B$  可以由  $C$  直接求逆得到。但是当  $n>3$ ,  $C$  不是方阵, 因此不能直接由  $C$  求逆得到  $B$ 。如式(15)所示, 这里显然存在“同色异谱”问题, 即每一组 ( $X, Y, Z$ ) 的解有可能对应多组 ( $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ )。一般来说, 为了求出矩阵  $B$ , 可以直接计算  $C$  的伪逆或采用主成分分析法(降维)、最小二乘法、维纳估计法、人工神经网络法等。但是, 这些方法也同样会面临“同色异谱”问题, 即在式(8)中, 对于任意一组给定的 ( $X, Y, Z$ ), 它的解 ( $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ ) 不是唯一的。为此, 提出一种查找表方法, 该方法可以由 ( $X, Y, Z$ ) 快速查找 ( $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ ):

$$\begin{cases} [k_1, k_2, \dots, k_n] = \text{LUT}[X_i, Y_j, Z_l] \\ i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max} \\ j = 0, 1, 2, \dots, j_{\max} \\ l = 0, 1, 2, \dots, l_{\max} \end{cases}, \quad (16)$$

式中:  $\text{LUT}[X_i, Y_j, Z_l]$  表示用查找表查找色度值 [ $X_i, Y_j, Z_l$ ] 对应的驱动值序列;  $i_{\max}, j_{\max}, l_{\max}$  分别为三维查找表三个维度的大小。式(16)可以看作一个 3 维空间到  $n$  维空间的查找表, 该表包含  $i \times j \times l$  个节点数据。例如, 当  $i_{\max} = 100, j_{\max} = 100, l_{\max} = 100$  时, 总共有  $10^6$  个节点, 每一个节点分别与一组 ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ) 对应。上述离散查找表可以采用计算机程序来实现, 过程如下:

1) 首先根据多基色显示系统的色度特性, 并参照

式(8)~(12)的方法,建立正向转换模型,即由 $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ 到 $(X, Y, Z)$ 的转换模型。

2)按一定的排列顺序,将3基色图像某一组 $(X_i, Y_j, Z_l)$ 作为正向转换模型的目标值。

3)按一定的排列顺序,对正向转换模型的每一节点 $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ 进行赋值,则可以计算得到每一个节点的输出 $(X, Y, Z)$ ;然后计算 $(X, Y, Z)$ 与目标值 $(X_i, Y_j, Z_l)$ 的色差,实验中采用CIE1976LAB色差。当色差最小时,得到的 $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ 是与 $(X_i, Y_j, Z_l)$ 对应的一个节点值。

4)当维度 $n > 3$ 时,步骤2)的计算量很大,因此需

要采用优化的搜索策略,如采用变步长的搜索方法加快搜索进度。

### 5 实验

为了验证所提出的多基色显示系统的驱动图像生成方法的有效性,并考虑到目前多基色显示系统的实际发展状况,以一种在研的5基色LED点阵显示系统为例进行计算和仿真,如图5所示。图5(a)为5个基色在特定驱动值下的光谱功率分布曲线,图5(b)为5个基色的色品坐标在CIE1931 XY色品图中的色品坐标和色域范围。

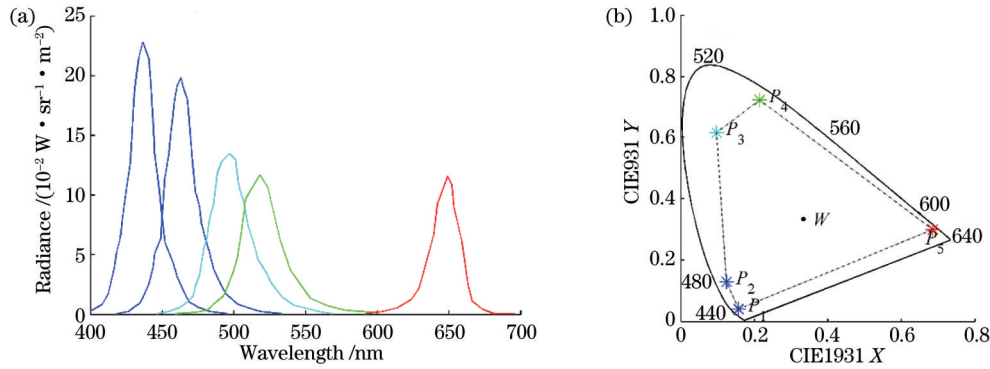


图5 一种5基色LED显示系统。(a)基色光谱;(b)色域分布

Fig. 5 5-primary color LED display system. (a) Primary spectrum; (b) color gamut

#### 5.1 基色光谱和色度

实验过程中,5基色LED点阵显示器采用了5种不同波长的LED器件,其主波长分别为444、468、500、520、652 nm,对应的色品坐标 $(x, y, z)$ 如表1所示。

表1 一种5基色LED显示屏的主波长及色品坐标

Table 1 Main wavelength and CIE 1931 chromaticities of 5-primary color LED display

Main wavelength / nm	444	468	500	520	652
$x$	0.1573	0.1241	0.0971	0.2143	0.6848
$y$	0.0413	0.1297	0.6141	0.7195	0.2988
$z$	0.8014	0.7462	0.2888	0.0662	0.0164

#### 5.2 正向转换模型

根据表1的数据,并参照式(7)~(12)的方法建立正向转换模型,即 $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ 空间到 $(X, Y, Z)$ 空间的转换模型:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.135 & 0.155 & 0.100 & 0.161 & 1.450 \\ 0.035 & 0.162 & 0.631 & 0.539 & 0.633 \\ 0.686 & 0.934 & 0.296 & 0.050 & 0.035 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

这里将显示器白场设置为CIE等能光谱色度,因此,当 $X=1, Y=1, Z=1$ 时,有 $k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=1$ 。

#### 5.3 逆向转换模型

根据式(16)描述的方法建立了由3基色图像转换到5基色图像的逆向查找表:

$$\begin{cases} [k_1, k_2, \dots, k_5] = \text{LUT}[X_i, Y_j, Z_l] \\ i = 0, 1, 2, \dots, 100 \\ j = 0, 1, 2, \dots, 100 \\ l = 0, 1, 2, \dots, 100 \end{cases} \quad (18)$$

逆向查找表总共包含 $10^6$ 个节点的数据;实验过程中,针对每一组给定的目标值 $(X_i, Y_j, Z_l)$ ,利用式(18)搜索对应的 $(k_1, k_2, \dots, k_5)$ 。为了减少计算量,采用了逐步缩小赋值区间和步长的方法,如 $(k_1, k_2, \dots, k_5)$ 5个值的起始区间为 $(1, 255)$ ,步长为25;然后逐步缩小搜索区域和步长,最终得到最优目标值 $(k_1, k_2, \dots, k_5)$ 。

#### 5.4 广色域目标图像

实验采用的目标图像为一幅具有广色域特性的XYZ图像,它由Canon 1000D相机拍摄的ColorChecker SG色卡的RAW格式RGB图像经过变换处理后得到。拍摄条件为:照明光源为Datacolor灯箱的D65,测量几何条件采用CIE 15:2004推荐的“ $45^\circ x:0^\circ$ ”,Canon 1000D相机的白场设定为D65。利用SG色卡四周的黑白色块校准照明条件,并选取SG色卡

中心的 96 个色块(不包含四周边缘的黑白色块)进行实验。

图 6(a)是由 ColorChecker SG 色卡 96 色块 XYZ 图

像变换得到的 sRGB 图像;图 6(b)是 SG 色卡 96 个色块的 CIE1931 XY 色品坐标分布。可以看出,在 D65 光源照明下,SG 色块的色域分布超出了 sRGB 色域。

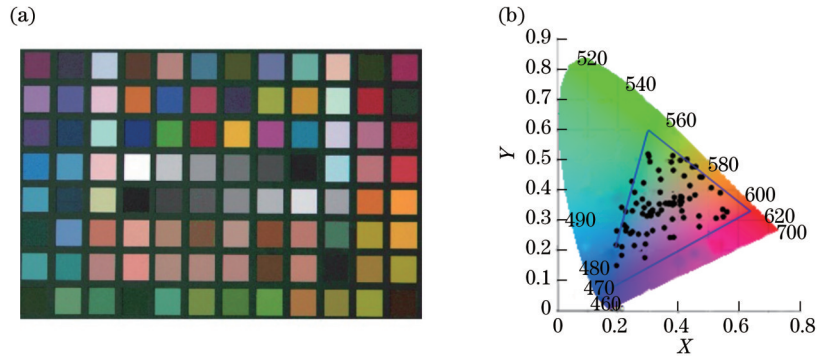


图 6 ColorChecker SG 色卡的广色域图像。(a) sRGB 图像;(b) 96 个色块的 CIE1931 XY 色品坐标

Fig. 6 Wide-gamut image of ColorChecker SG. (a) sRGB image; (b) CIE1931 XY coordinates of 96 blocks

### 5.5 实验结果

根据所建立的逆向查找表即式(18),对 SG 色卡

的 (X, Y, Z) 图像进行变换,得到 LED 点阵显示系统的 5 个基色的驱动图像,如图 7 所示。

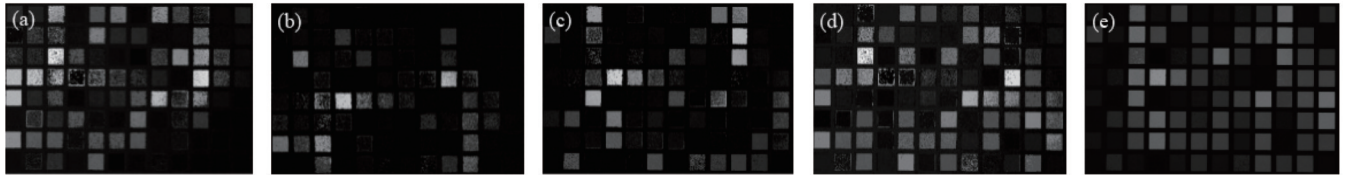


图 7 实验所得的 5 基色 LED 显示器的驱动图像。(a) 444 nm; (b) 468 nm; (c) 500 nm; (d) 520 nm; (e) 652 nm

Fig. 7 Driven images of 5-primary-color LED display obtained by experiment. (a) 444 nm; (b) 468 nm; (c) 500 nm; (d) 520 nm; (e) 652 nm

为了模拟 5 基色 LED 显示器的显示效果,将图 7 所示 SG 色卡的 5 基色 ( $k_1, k_2, \dots, k_5$ ) 图像代入正向转换模型[式(17)]进行计算,可以得到 SG 色卡的 5 基色 LED 点阵显示器显示结果 (X, Y, Z), 其与 SG 色卡在 D65 光源下的理论色度值之间的 CIELAB 色差值与 CIELUV 色差值如图 8 所示,其中的最小值、最大值和平均值如表 2 所示。

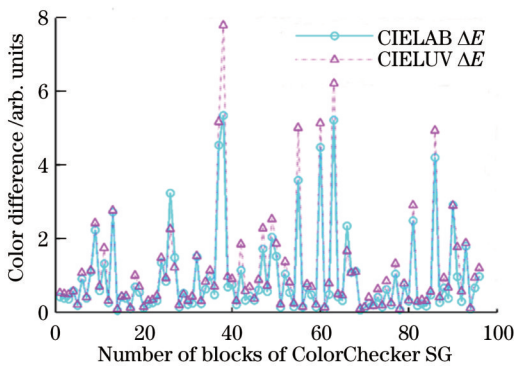


图 8 SG 色卡 96 色块的模型结果与理论值之间的色差

Fig. 8 Color difference between simulation result and theoretical value of 96 color blocks of SG color

表 2 色差的最小值、平均值和最大值

Color difference	Minimum $\Delta E$	Average $\Delta E$	Maximum $\Delta E$
CIELAB $\Delta E$	0.04	0.93	5.34
CIELUV $\Delta E$	0.08	1.13	7.79

### 5.6 讨论

1) 由图 6(b)可以看出,实验中采用的目标图像由 Canon 相机的拍摄所得,为 96 个 SG 色块的 XYZ 图像,其色域范围超出了 sRGB 色域范围,因此具有广色域的特点。在转换模型误差足够小的情况下,所生成的驱动图像由多基色显示设备显示时也是具备广色域特点的,所生成的驱动图像充分利用了显示设备的色域范围极限。

2) 由图 7 可以看出,所得到的 5 基色图像的像素灰度值存在一些非均匀分布问题,也称作颗粒现象,该现象不利于均衡发挥各个光谱通道的作用,或将影响发光器件的寿命,但是这并不会影响 5 基色 LED 点阵显示器颜色的最终合成效果。

3) 图 8 中 96 个色块的色差大多分布在 2 以下,个别色块的色差稍大,缩小步长可减小个别稍大的色差,实验中的步长参数设为 25,这是权衡色差大小和计算



速度的结果。从图 8 和表 2 所示的色差数据中可以看出,在一定条件下该模型取得了足够的颜色显示效果。

## 6 结 论

本文研究表明,广色域多基色显示系统的驱动图像可以由三基色的广色域 RGB 相机获取后转换生成,该方法解决了多基色显示系统高分辨率、高帧率图像源的获取问题。但是,本文方法所生成的多基色驱动图像存在非均匀性分布现象或颗粒现象,该现象不利于均衡发挥各个光谱通道的作用,或将影响发光器件的寿命,该问题有必要在未来的研究中得到解决。由于高分辨率、大面阵的多基色显示屏的制作难度很高,目前尚无 4 基色以上的多基色显示系统可以利用,因此本文的实验过程大都采用了仿真形式。此外,本文的模型推导和实验是在假设  $n$  基色显示系统满足三刺激值叠加原理的基础上进行的,对于像素点单独驱动点亮的点阵 LED 显示系统具有一定的实用价值;然而,实际中多基色显示系统所采用的原理各不相同,如 LED 背光的 LCD 面板、投影显示、AMOLED 显示等,需要进一步分析通道相关性的影响,这也将导致本文方法的不确定性。尽管如此,本文的理论模型和实验结果对于广色域多基色显示系统的驱动图像生成具有重要的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] Sun Y, Xi Y H, Zhang X M, et al. P-12.6: research on color conversion model of multi-primary-color display[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52(S2): 982-984.
- [2] Huraibat K, Perales E, Viqueira V, et al. A multi-primary empirical model based on a quantum dots display technology[J]. Color Research & Application, 2020, 45(3): 393-400.
- [3] Hexley A C, Yöntem A Ö, Spitschan M, et al. Demonstrating a multi-primary high dynamic range display system for vision experiments[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(4): A271-A284.
- [4] Lin S Y, Tan G J, Yu J H, et al. Multi-primary-color quantum-dot down-converting films for display applications[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28480-28493.
- [5] Kim H J, Shin M H, Lee J Y, et al. Realization of 95% of the Rec. 2020 color gamut in a highly efficient LCD using a patterned quantum dot film[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 10724-10734.
- [6] Xiong Y, Deng F, Xu S, et al. Performance analysis of multi-primary color display based on OLEDs/PLEDs[J]. Optics Communications, 2017, 398: 49-55.
- [7] Centore P. Minimal-energy control sequences for linear multi-primary displays[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2015, 59(5): 050502.
- [8] Luo Z Y, Wu S T. A spatiotemporal four-primary color LCD with quantum dots[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(5): 367-372.
- [9] Sano Y, Nonaka R, Baba M. Wide gamut LCD using locally dimmable four-primary-color LED backlight[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(9): 539-546.
- [10] Teragawa M, Yoshida A, Yoshiyama K, et al. Review paper: multi-primary-color displays: the latest technologies and their benefits[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(1): 1-11.
- [11] Cheng H C, Rao L H, Wu S T. Color breakup suppression in field-sequential five-primary-color LCDs[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(6): 229-234.
- [12] Cheng H C, Ben-David I, Wu S T. Five-primary-color LCDs [J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(1): 3-7.
- [13] Ouyang M, Huang S W. Determination of gamut boundary description for multi-primary color displays[J]. Optics Express, 2007, 15(20): 13388-13403.
- [14] Takaya M, Ito K, Ohashi G, et al. Color-conversion method for a multi-primary display to reduce power consumption and conversion time[J]. Journal of the Society for Information Display, 2005, 13(8): 685-690.
- [15] Motomura H. Color conversion for a multi-primary display using linear interpolation on equi-luminance plane method (LIQUID) [J]. Journal of the Society for Information Display, 2003, 11(2): 371.
- [16] Ajito T, Ohsawa K, Obi T, et al. Color conversion method for multiprimary display using matrix switching[J]. Optical Review, 2001, 8(3): 191-197.
- [17] Tomizawa K, Nakamura K, Ueki S, et al. Multi-primary-color LCD: its characteristics and extended applications[J]. Journal of the Society for Information Display, 2011, 19(5): 369-379.
- [18] Ajito T, Obi T, Yamaguchi M, et al. Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3954: 130-137.
- [19] 徐鹏, 章海军, 张克奇, 等. 基于均匀颜色样本的彩色数码相机色度特征化目标样本优化[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1133001.
- [20] 刘浩学, 郑岚, 代黎, 等. 基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1233002.
- [21] 王乐然, 李富琳, 孙毅轩, 等. 基于 Micro-LED 照明的量子点颜色转换特性[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2325002.

# Production of Driven Images for Wide-Color-Gamut Multi-Primary Display Systems

Li Yasheng<sup>1</sup>, Liao Ningfang<sup>1\*</sup>, Li Yumei<sup>1</sup>, Li Songlin<sup>2</sup>, Wu Wenmin<sup>1</sup>, Fan Qiumei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Discipline Laboratory of Color Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Leyard Optoelectronics Co., Ltd., Beijing 100091, China

## Abstract

**Objective** Wide-color-gamut display systems play an important role in the fields of electronic commerce, digital archives, design, simulation, and medical systems. In contrast to conventional three-primary display systems whose color gamut is limited to a triangle area, multi-primary display systems are more appropriate for wide-color-gamut display thanks to their larger polygonal color gamut. Nowadays, various multi-primary display systems have been put forward, such as four-primary, five-primary, and six-primary display systems. The theoretical studies of multi-primary display mainly focus on the conversion models between the multi-primary space and the standard CIE XYZ color space. However, the acquisition or production of driven images remains difficult for multi-primary display. It is a challenge for a conventional camera to capture color images which match multi-primary display with a wide color gamut. Besides, the driven images of multi-primary display have more than three channels, and thus they cannot be produced directly from three-primary images due to metamerism. In this paper, we introduce multi-primary LED dot matrix display, which has the advantages of a large size, a wide color gamut, high brightness, and a large dynamic range. To drive multi-primary LED dot matrix display with correct color reproduction, we propose a method to produce driven images for multi-primary display systems by using a conventional RGB camera. We hope that our method can be helpful for wide-color-gamut multi-primary display.

**Methods** We measured the spectral sensitivity of four typical digital cameras, including Canon 1000D, Fuji X-E3, Nikon J1, and Sony F828, and analyzed their color acquisition ability. In light of the colorimetry theory and with numerical methods, we built a forward model which can convert the  $n$ -primary space of a display system to the standard CIE XYZ color space and then built an inverse model for the conversion from three-primary space to  $n$ -primary space by using a look-up table from three-dimensional space to  $n$ -dimensional space. A five-primary LED dot matrix display system was simulated utilizing typical LED components, and the ColorChecker SG target with a wide color gamut was used as the target image. We experimented with our conversion method on this five-primary LED dot matrix display system.

**Results and Discussions** Since the target image is a raw color image of the ColorChecker SG target and its color gamut exceeds the sRGB gamut, it has the characteristics of a wide color gamut. If the illumination is changed, such as using a high-chroma light source, its color gamut can be further increased. When the colorimetric parameters of the five-primary LED dot matrix display are determined, the forward model can be easily built according to the proposed method. The chromatic aberration of 96 color blocks is mostly less than 2. Reducing the step size can lower the chromatic aberration of individual color blocks. The step-size parameter in the experiment is set as 25, which is the result of balancing the chromatic aberration and the calculation speed. The experimental results show that our method can produce images with the use of an RGB camera for driving the five-primary LED display system, and desired color reproduction can be achieved. There are some non-uniform distributions in the five-primary driven images, which will not affect the final display result.

**Conclusions** The colorimetry theory and numerical methods help build a forward model and an inverse model for image conversion between the  $n$ -primary space of an LED dot matrix display system and the three-primary space of a CIE1931 XYZ system. The experimental results demonstrate that our models can easily produce multi-primary images from wide-color-gamut RGB images for driving LED dot matrix display and achieve desired color reproduction. Next, our work will focus on improvements in the color reproduction accuracy, the color gamut of the target image, the uniformity of the primary images, and the production speed of multi-primary images. It should be noted that our method is based on the assumption that the  $n$ -primary display system is in line with the principle of linear superposition, which is suitable for LED display systems. The method is promising in wide-color-gamut multi-primary display systems whose channels are highly independent.

**Key words** visual optics; multi-primary display; wide-color-gamut display; LED display device; multi-spectral imaging