

文章编号 1004-924X(2013)03-0575-08

用彩色 CCD 相机测量发光二极管显示屏的色度

赵梓权^{1,2*}, 王瑞光¹, 郑喜凤¹, 汪 洋¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:提出了一种高精度色度计和彩色 CCD 相机相结合快速测量发光二极管(LED)显示像素的亮度和色度的方法。首先,用彩色 CCD 相机测量 LED 显示像素,通过图像处理提取每个 LED 显示像素点在 RGB 颜色空间中的亮度值和色度值。然后,建立 RGB 颜色空间和 CIE1931XYZ 颜色空间的多通道自适应矩阵,并使用色度计对部分 LED 显示像素点进行精确测量,基于精确测量值和对应的 RGB 值计算出自适应矩阵。最后,通过自适应矩阵计算出所有 LED 显示像素的亮度和色度值。实验结果表明:自适应矩阵大小合适的情况下,该方法计算出的数据与色度计测量数据之间的色差值 $\Delta E < 1$,在人眼视觉中的颜色差异轻微,可快速、精确地采集 LED 显示像素的亮度和色度值,实现 LED 显示屏的高精度亮度、色度校正,从而大幅提高 LED 显示屏的显示效果。

关键词:发光二极管显示屏;彩色 CCD 相机;自适应矩阵;色度测量;亮度测量

中图分类号: TN312.8; TN873 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0575

Measurement of chroma of LED displays with color CCD camera

ZHAO Zi-quan^{1,2*}, WANG Rui-guang¹, ZHENG Xi-feng¹, Wang Yang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhzq169@yahoo.com.cn*

Abstract: A method by combination of a colorimeter and a color CCD to measure the brightness and chroma of color pixels of a Light Emitting Diode(LED) was proposed. Firstly, the color pixels of the LED were processed by the CCD camera and the brightness and chroma values of the LED pixels in RGB color space were calculated by image processing. Then, the multi-channel and adaptive matrix between RGB color space and CIE1931XYZ color space were established and the measured data of a few LED pixels were obtained by the colorimeter. With the RGB values and the measured data, the adaptive matrix could be calculated. Finally, the tristimulus values of the LEDs were calculated with the adaptive matrix. Experimental results indicate that the color difference between calculated data and measured data is less than 1 in an appropriate size of adaptive matrix, which can obtain the brightness and chroma of color pixels of the LED rapidly and precisely, and can correct the brightness and chroma of the LED screen. The method can be used to measure hundreds of thousands of LEDs accu-

收稿日期:2012-11-13;修订日期:2012-12-13.

基金项目:国家科技支撑计划基金资助项目(No. 2009BAE73B01)

rately in a short time.

Key words: Light Emitting Diode(LED) display; color CCD camera; adaptive matrix; chroma measurement; brightness measurement

1 引言

发光二极管(LED)显示屏通常由数十万个以上的 LED 芯片组成,LED 发光在波长和亮度上具有一定的离散性,这会极大地影响 LED 显示屏的显示质量。要实现高质量的显示效果,需要对 LED 显示屏的每个显示像素进行亮度和色度的校正。校正过程最大的难点在于 LED 显示屏亮、色度数据的高精度采集,数据采集的精度和准确性将直接影响最终的校正效果。LED 亮度和颜色的高精度测量应使用准确度较高的点测量设备,诸如 Photo Research 公司的 PR-1980A、PR655 等设备。这些点测量设备基于 CIE1931XYZ 颜色系统进行设计,配有接近人眼光谱响应函数的滤色片,其缺点是成本高昂,速度慢,无法完成大规模的 LED 阵列检测任务^[1-3]。另一方面,早期的色度计并不适合于 LED 的色度测量,这是因为 LED 发光可视为脉冲光,功率谱分布较为集中,通常峰值波长的差异值在 5~10 nm,而早期的色度计颜色测量通道仅有 3 个,不能准确地测量出被人眼感知的色差,因而色度计不能用于 LED 色度的精确测量。为了进一步提高测量的准确度,现在的色度计如 PR655 之类等多采用多通道测量技术,并通过自适应矩阵对测量结果进行修正^[4-5],测量颜色的色坐标精度可以达到亮度 $\pm 2\%$,CIE1931XYZ: ± 0.0015 。

不过用色度计作为点测量设备,不适用于大规模的 LED 矩阵测量,现有的 LED 显示屏测量方案仍然以 CCD 相机作为主流的亮、色度采集设备。用 CCD 相机采集数据用于 LED 显示屏的亮度和色度的均匀性校正已经实现了工程应用,CCD 相机作为测量设备对 LED 发光时亮度和色度的相对差异值测量的有效性,也已经得到了验证;但 CCD 相机的输出信号为 RGB 信号,其光谱响应函数很难与人眼的光谱响应函数匹配,不能实现对 LED 颜色的精确测量,测量值与真实值的色差 ΔE 在 5~10,人眼能明显感觉出这种色差。

LED 显示屏的显示质量以人眼视觉感受作为最终的评价标准,当需要对 LED 显示屏进行精确的色度校正而非均匀性校正时,CCD 相机的精度便不能满足人眼视觉要求。

目前,美国的 radiant imaging 等公司开发了基于 CIE1931XYZ 系统的 LED 显示屏色度校正设备^[6],使用配有满足人眼光谱响应函数的滤色片的彩色 CCD 相机。该相机采用 4 通道成像,工作温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,能进行快速、大规模的 LED 阵列测量,在商业应用领域处于领先水平;但它价格昂贵,对使用环境要求苛刻,测量得到的 LED 颜色的测量值和真实值的色差仍然未能完全满足人眼视觉感受的要求。国内已公开的 LED 显示屏色度测量方案以普通 CCD 相机为采集设备^[7],在进行色度测量时,以标准色表为标准,用人眼来衡量标准色表与 LED 色度的匹配度,测量结果受测量人员的主观影响较大,难以保证测量精度。此外,该方案受观察环境的影响较大,测得的颜色容易出现失真。

本文采用高精度色度计与彩色 CCD 相机配合的测量方案,通过色度计提供少数 LED 显示像素准确的 XYZ 三刺激值,同时用图像处理方法从彩色 CCD 相机中得到基于 RGB 颜色空间的所有 LED 显示像素点的色度值。然后,基于彩色相机 3 个颜色通道中得到的强度值建立了不同尺寸的自适应矩阵,并用相同 LED 显示像素的 RGB 数据和 XYZ 三刺激值求解出两组数据之间的自适应矩阵。最后,利用求出的自适应矩阵对 RGB 数据进行修正,将所有 LED 显示屏显示像素点的 RGB 数据转化为 XYZ 三刺激值。

2 LED 显示屏的色度提取

2.1 LED 显示屏的显示特性

全彩色 LED 显示屏以显示像素为单位,每个 LED 像素中封装有红、绿、蓝 3 个颜色的 LED,3 个单色的 LED 分别发出的光被视为 LED 显示屏的三原色。LED 显示屏多采用脉宽调制(Pulse

Width Modulation, PWM) 的驱动方式,灰度级由不同的脉冲宽度来表示^[8]。因此,LED 的发光状态总是相同,其灰度级以发光时间长短来表示。式(1)为 LED 的色坐标计算公式。

$$\begin{cases} x = \frac{tX}{tX + tY + tZ} = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{tY}{tX + tY + tZ} = \frac{Y}{X + Y + Z} \end{cases} \quad (1)$$

其中: X, Y, Z 为三刺激值; t 为发光时间,LED 通过脉宽调制产生灰度级时,发光时间 t 决定了灰度级的大小。从式(1)可知,无论灰度级如何变化,其色坐标始终不变。

灰度级和 XYZ 三刺激值之间存在与时间 t 相关的线性关系。当 LED 显示屏总的灰度级级数为 N 时,灰度级 k 所对应的 XYZ 三刺激值为:

$$\begin{cases} X' = k \frac{X}{N} \\ Y' = k \frac{Y}{N} \\ Z' = k \frac{Z}{N} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 LED 显示屏在彩色 CCD 相机中的色度信息

LED 全彩显示屏中的色彩复现是以三原色加色理论为基础,任何颜色均由一个 LED 点内封装的红、绿、蓝 3 个发光部件按照不同的发光比例合成,对应于 RGB 模型中的红、绿、蓝 3 个色层。LED 发光在 LED 点的封装内进行混合,再通过封装发散到外部空间中。从彩色 CCD 相机中读取的是 LED 发光在红色、绿色、蓝色图层上的强度分布信息^[9-10]。以图 1 中 LED 面板上所有蓝色 LED 发光为例,每个 LED 显示像素在 CCD 相机中的成像区域可近似为 $N \times N$ 个像素点(此处忽略成像区域为 $M \times N$ 的情况),色度提取时必须考虑提取像素点的范围。设一个 LED 显示像素的区域范围为 $A, A(i, j)$ 为 A 内坐标 (i, j) 对应的像素点的强度值, D 为 A 内和值最大的 $n \times n$

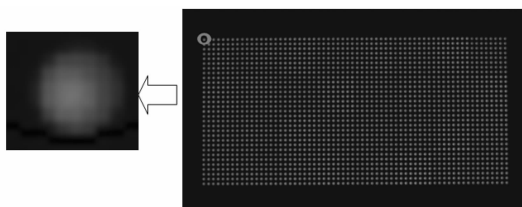


图 1 LED 显示屏在彩色 CCD 相机中的成像
Fig. 1 Imaging of LED displays in color CCD camera

像素点矩阵对应的强度值的累加和,用来表示一个 LED 显示像素在对应成像图层上的强度值,其中 $n \in (1, N)$ 。

$$D \sum_{i,j \in A} \max(A(i:i+n-1; j:j+n-1)). \quad (3)$$

理论上,当 $n=N$ 时,所有对应像素点强度的和值能最完整地表现 LED 发光的强度信息。而从图 2 中可知, $n=4$ 时矩阵的强度提取效果与 $n=N$ 时几乎完全一致,这说明在提取 LED 显示像素的强度数据时,采用的提取矩阵 $n \times n$ 具有一定的抗干扰性,因此 n 值的确定可以不必非常精确,即在用算法进行边缘提取时可以适当忽略一些边缘区域。而随着 $n \times n$ 矩阵使用像素点的逐渐减少,数据提取效果将会逐渐变差,尤其在用 $n=1$ (即仅取最大值)进行数据提取时,信息丢失现象明显,此时提取的亮、色度信息已经不能表现 LED 显示像素之间的亮、色度差异,数据提取出现了错误。

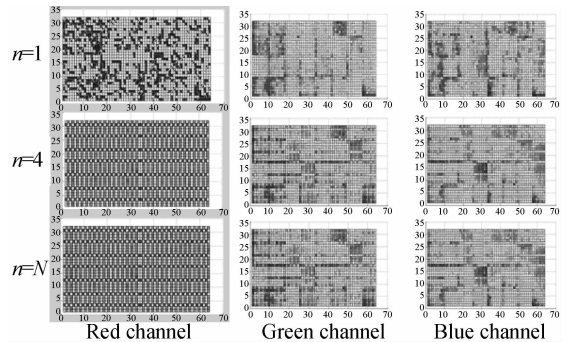


图 2 LED 显示屏在红、绿、蓝图层上不同 n 值的强度提取效果

Fig. 2 Intensity distribution of LED display with different n in the red, green and blue channels

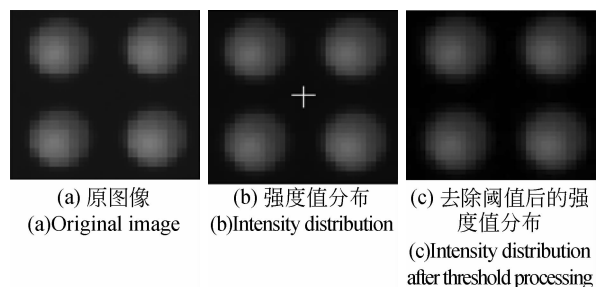


图 3 LED 显示像素点的强度值分布
Fig. 3 Intensity distributions of LED display pixels

因此,对于图 3 中 CCD 相机拍摄的彩色图像,在转化为强度值分布图像后,以 4 个 LED 显示像素点中心区域(即白色十字区域)的平均值作为图片的背景强度值,对这 4 个像素点去除一个比背景强度稍大的阈值 T 后,会得到新的强度值分布。尽管去除背景强度的阈值处理将会使 LED 发光的成像区域的形状稍微变小,但 $n \times n$ 的提取矩阵具有一定的抗干扰能力,能够保证最终的强度提取效果,为阈值处理算法的合理性奠定了理论基础。本文的阈值处理算法表达式如式(4)所示。

$$p(i,j) = \begin{cases} 1, x(i,j) \geq T \\ 0, x(i,j) < T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(i,j)$ 为对应图层坐标 (i,j) 的强度值, $p(i,j)$ 为坐标 (i,j) 的二值化值。二值化后 LED 显示像素的轮廓如图 4(a)中的白色区域,通过图像处理算法得到各 LED 显示像素的中心位置,连接相邻显示像素的中心位置,可以得到水平方向上 LED 显示像素间的距离为 m 个像素,竖直方向上的距离为 l 个像素,因此,LED 显示像素的提取区域为如图 4(c)中的 P_1 区域,其大小为 $m \times l$ 。

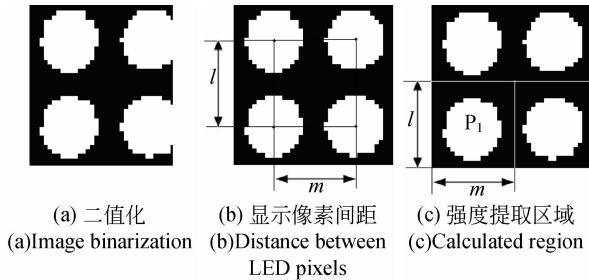


图 4 LED 显示像素点的强度值提取区域

Fig. 4 Region calculation for intensity of LED display pixels

对 P_1 区域的像素值进行积分,就能得到相应的 LED 显示像素点的亮度和色度信息:

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l p_1(i,j)r(i,j), \quad (5)$$

$$G = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l p_1(i,j)g(i,j), \quad (6)$$

$$B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l p_1(i,j)b(i,j). \quad (7)$$

$$I = R + G + B. \quad (8)$$

其中: $p_1(i,j)$ 为 P_1 区域中坐标 (i,j) 上对应的二值化值; $r(i,j)$, $g(i,j)$, $b(i,j)$ 分别为 P_1 区域中

红、绿、蓝图层上坐标 (i,j) 上的强度值; R,G,B 分别表示该显示像素点在红色、绿色、蓝色图层的强度值, I 表示亮度值。

在亮度值和色度值的提取过程中,本文并没有使用任何去噪算法,这是因为去噪算法会改变对应像素点上的强度值,这对于测量 LED 之间的亮度、色度差异是不利的。色度测量中的降噪处理,需以不损失 LED 间的亮度、色度差异为前提。对提取出的 R,G,B 信息最有效的去噪方法是通过多次测量来降低随机噪声的影响^[11],如式(9)所示。

$$\bar{R} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i. \quad (9)$$

其中: M 为测量的次数, R_i 为第 i 次测量后通过式(5)得到的显示像素点在红色图层上的强度值。同理,可以得到 \bar{G} 和 \bar{B} 。在得到 $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ 值后,针对 LED 显示屏的显示特性,可以对测量结果进行适当的降噪处理。由于 LED 显示屏的灰度级由脉宽调制驱动方法产生,故 LED 显示屏的控制灰度级与发光强度值之间应为线性关系,如式(2)所示。理论上可用 $\bar{R} = bk$ 表示, k 为控制灰度级, b 为常数。但由于 CCD 相机本身只能测量相对值,因此,该线性关系应描述为:

$$\bar{R} = c + bk. \quad (10)$$

在对 LED 显示像素多个灰度级的发光情况进行测量后,用线性拟合的方法求解出 c, b 的值,从而将 LED 显示像素的强度值从 \bar{R} 修正到 \bar{R}' :

$$\bar{R}' = c + bK, \quad (11)$$

其中: K 为 LED 需测量的发光状态所对应的灰度级。同理,可以得到 \bar{G}', \bar{B}' 。

3 颜色空间转换

CCD 相机成像颜色空间为 RGB 空间,其测量数据仅具有相对值意义,可以用于亮度和色度的均匀性校正。但对于准确的亮度校正和色度校正,CCD 相机中得到的数据必须转换到 CIE1931XYZ 颜色空间后,才能进行使用。

常见的颜色空间转换方法见式(12),通过乘以一个 3×3 的自适应矩阵,对测量的数据进行修正,将 RGB 信号转换为 XYZ 三刺激值^[4-5]。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{R}' \\ \bar{G}' \\ \bar{B}' \end{bmatrix}. \quad (12)$$

要得到常系数 $a_{11} \sim a_{33}$ 的具体数值,首先应用基于 CIE1931XYZ 颜色空间的的高精度测量设备得到式(12)中的 X, Y, Z 三刺激值,再从 CCD 相机得到 $\bar{R}', \bar{G}', \bar{B}'$ 值,从而计算出 3×3 的转移矩阵。之后,再通过这个 3×3 的自适应矩阵将 RGB 颜色空间中所有的数据转移到 CIE1931XYZ 颜色空间中。这个 3×3 的矩阵直接关系到 XYZ 三刺激值的准确度。为了降低颜色空间转化过程带来的误差,颜色科学领域的研究者们提出了多通道测量技术,使用多个通道或多个 CCD 进行测量,并通过拓展自适应矩阵的维度,使矩阵尺寸变为 $3 \times 4, 3 \times 6$ 甚至 3×9 来大大减少颜色空间转化过程带来的误差。本文使用彩色 CCD 相机作为测量手段,将彩色 CCD 相机的红色、绿色、蓝色 3 个图层作为测量通道,颜色深度为 10 bit,相机的光谱响应函数如图 5 所示。

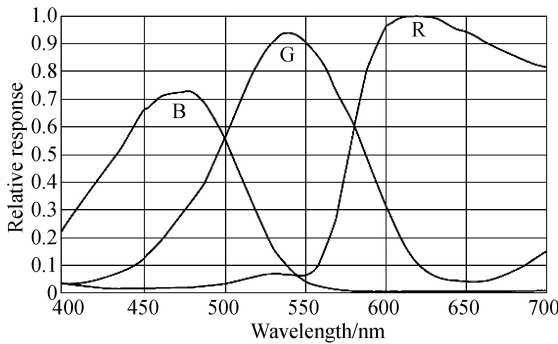


图 5 彩色 CCD 相机的光谱响应函数

Fig. 5 Spectral response functions of color CCD camera

常规的民用或工业 CCD 相机的光谱响应曲线与人眼视觉的响应函数有较大差异,因此用于测量颜色差异的 CCD 应尽量满足以下几点:

- (1) 光谱响应函数不能为负值;
- (2) 光谱响应函数只能有一个极大值,自适应矩阵才能在对应的线性方程中得到合理的解;
- (3) R, G, B 所对应的响应函数之间的重叠区域尽可能小;
- (4) R, G, B 所对应的响应函数在相同能量下应有相同的测量强度值,如差异过大,应对相机的红、绿、蓝 3 通道进行白平衡处理。

通常情况下,很难知道普通 CCD 相机具体的光谱响应函数,能确定的只有第(4)点:对红、绿、蓝通道进行白平衡处理,调节不同通道的增益。而使用棱镜进行分光的 3CCD 相机能较好地满足上述 4 点要求,它的光谱响应函数如图 6 所示。

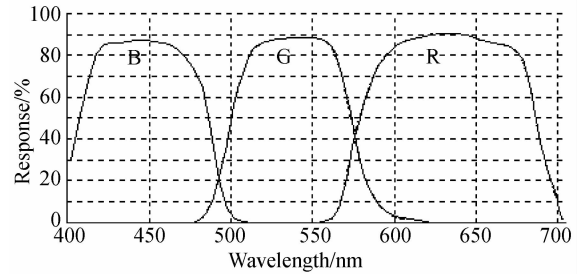


图 6 理想状态的光谱响应函数

Fig. 6 Proposed spectral distribution functions

将 $\bar{R}', \bar{G}', \bar{B}'$ 转化为 XYZ 三刺激值的过程可以描述为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1z} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2z} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_z \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中: z 为通道数量, $3 \times z$ 为这个自适应矩阵的尺寸。显然,彩色 CCD 成像只有红、绿、蓝 3 个通道,此时有:

$$S_1 = \bar{R}', \quad (14)$$

$$S_2 = \bar{G}', \quad (15)$$

$$S_3 = \bar{B}'. \quad (16)$$

而 S_z 可以根据已有的 $\bar{R}', \bar{G}', \bar{B}'$ 构造出来,如:

$$S_4 = \bar{R}'\bar{G}', \quad (17)$$

$$S_5 = \bar{R}'\bar{B}', \quad (18)$$

$$S_6 = \bar{G}'\bar{B}', \quad (19)$$

$$S_7 = \bar{R}'^2, \quad (20)$$

$$S_8 = \bar{G}'^2, \quad (21)$$

$$S_9 = \bar{B}'^2. \quad (22)$$

如有必要,可以构造出更多的 S_z 。式(13)中,XYZ 三刺激值数据可由拥有更高测量精度的点测量设备提供; $S_1 \sim S_z$ 由彩色 CCD 相机所提供的数据进行构造。在进行多组测量后,根据对应的 XYZ 值和 S_z 值,就能求出这个 $3 \times z$ 的自适应矩阵。之后,再用这个自适应矩阵乘以

每个 LED 显示像素的 $\bar{R}', \bar{G}', \bar{B}'$ 构造出来的数据, 就能得到这个 LED 显示像素的三刺激值。以 3×9 的矩阵为例, LED 显示像素的三刺激值为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{29} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{R}' \\ \bar{G}' \\ \bar{B}' \\ \bar{R}'\bar{G}' \\ \bar{R}'\bar{B}' \\ \bar{G}'\bar{B}' \\ \bar{R}'^2 \\ \bar{G}'^2 \\ \bar{B}'^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

4 实验与分析

本文用多种尺寸的自适应矩阵对一组红色、绿色、蓝色 LED 进行了测量, 其中每种颜色的 LED 为 9 个。彩色 CCD 相机的光谱响应函数如图 5 所示, 彩色 CCD 相机已完成响应的非均匀性校正和非线性校正^[12], CCD 相机镜头已完成像面畸变校正^[13]。色度计精度为: 亮度 $\pm 2\%$; CIE1931XYZ: ± 0.0015 。

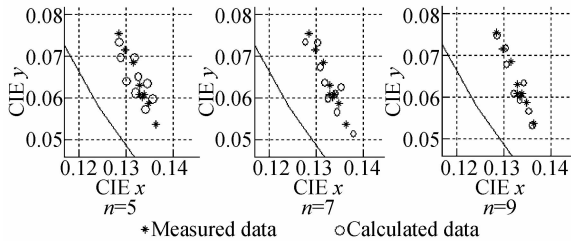


图 7 蓝光 LED 的测量色坐标与计算色坐标

Fig. 7 Color coordinates of measured data and calculated data for blue LEDs

图 7 中, “*”表示用色度计测量的蓝光 LED 的真实色坐标, “o”表示本文方法计算出的色坐标。当 z 的取值从 5 变化到 9 的过程中, 测量值与计算值的关系从原来的混乱状态变为一一对应, 且色坐标距离逐渐变小。同理, 可以得到绿色 LED 和红色 LED 的测量结果, 分别如图 8、图 9 所示。

以 D65 为标准光源, 在 CIE1976LUV 颜色空间中对 LED 的测量三刺激值与计算三刺激值进

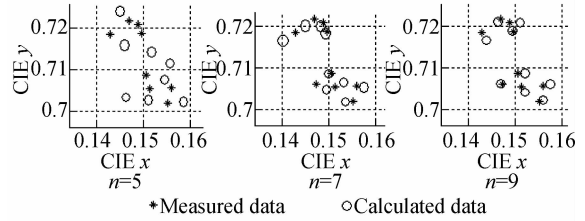


图 8 绿光 LED 的测量色坐标与计算色坐标

Fig. 8 Color coordinates of measured data and calculated data for green LEDs

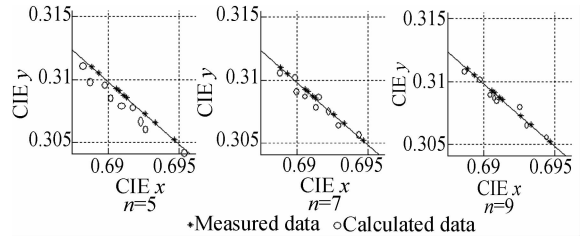


图 9 红光 LED 的测量色坐标与计算色坐标

Fig. 9 Color coordinates of measured data and calculated data for red LEDs

行色差计算^[14], 不同大小的自适应矩阵对应的平均色差如表 1 所示。

表 1 自适应矩阵大小与 ΔE 的关系

Tab. 1 Changes in ΔE with different sizes of adaptive matrix

Size	3×3	3×5	3×6	3×7	3×9	3×10	3×11
ΔE	8.2	6	5.1	3.5	0.9	0.9	0.8

当矩阵的尺寸为 3×9 时, 此时的 ΔE 所代表的色差在人眼中的视觉感受已经非常轻微, 这样的维度下, 计算出的三刺激值已经可以满足以视觉感受为主的 LED 显示应用。在工程实际应用中, 可以根据精度要求选择矩阵的大小, 以降低计算量。需要注意的是, 受 CCD 相机的光谱响应函数、测量环境、LED 控制系统等诸多因素的影响, 一味的增大自适应矩阵的大小并不一定能使测量精度持续提高, 而每次计算出的自适应矩阵对数据的修正效果也并不完全一致。自适应矩阵的效果与构造通道 S_n 的方法密切相关, 并有一定的随机性。 ΔE 与人眼视觉感受的关系如表 2 所示。

表2 ΔE 与人眼视觉感受的关系Tab.2 Relationship between ΔE and visual perception

$\Delta E(\text{NBS})$	Visual perception
0~0.5	negligible
0.5~1.5	slight
1.5~3	noticeable
3~6	appreciable
6~12	much
>12	strong

5 结 论

本文利用色度计加彩色 CCD 相机的方法对

LED 的颜色进行了精确测量,通过计算色度计测量值和彩色 CCD 相机测量值之间的自适应矩阵来实现 RGB 信息和 XYZ 三刺激值之间的高精度转换。该方法改善了色度计设备因测量速度慢不能满足大规模阵列测量要求和 CCD 相机测量精度不够的现状,使用普通彩色 CCD 相机就能实现对 LED 阵列色度的快速、准确测量。实验结果显示,颜色与真实测量值之间的色差 ΔE 小于 1,在人眼视觉中的颜色差异轻微。此结果表明该方法可快速、精确地采集数十万个 LED 显示像素的亮、色度值,可实现 LED 显示屏的高精度亮、色度校正,从而大幅提高 LED 显示屏的显示效果,是 LED 屏幕显示质量标准化技术的基础。

参考文献:

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage. *Measurement of LEDs*[S]. Publication CIE127-1997.
- [2] LIANG K K, LI W, REN H R, *et al.*. Color measurement for RGB white LEDs in solid-state lighting using a BDI photodetector [J]. *Displays*, 2009, 30(3): 107-113.
- [3] TRAVIS D. Statistical methods for testing the visual quality of displays [J]. *Displays*, 1998, 19(18): 29-36.
- [4] KOSZTYÁN Z T, EPELDAUER G P, SCHANDA J D, *et al.*. Matrix-based color measurement corrections of tristimulus colorimeters [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(12): 2288-2301.
- [5] TAHSEEN E, TOMOHIRO H, GOSUKE O, *et al.*. Development of a camera system for the acquisition of high-fidelity colors [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2006, E89-C(10): 1441-1447.
- [6] HARRIS S. Color and luminance uniformity correction for LED video screens [Z/OL]. <http://www.Signindustry.com>.
- [7] 杨城. 基于彩色相机的 LED 色度测量方法的研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
YANG CH. *Research on LED Chroma Measure Method Based on Color Camera*[D]. Xi'an: Graduate University of the XiDian University, 2010. (in Chinese)
- [8] SVILAINIS L. LED brightness control for video display application [J]. *Displays*, 2008, 29(5): 506-511.
- [9] 郑喜凤,宋新丽,刘贵华,等. 一种基于区域最大值的 LED 显示屏亮度特征数据提取方法[J]. 液晶与显示, 2008, 23: 453-457.
ZHENG X F, SONG X L, LIU G H, *et al.*. Luminance data extraction method of LED display panel based on regional maximum [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2008, 23: 453-457. (in Chinese)
- [10] 张鑫,王瑞光,陈宇,等. LED 显示屏相机采集影像渐晕的修正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2332-2338.
ZHANG X, WANG R G, CHEN Y, *et al.*. Calibration of image vignetting acquired by camera on LED display panel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2332-2338. (in Chinese)
- [11] 刘文耀. 数字图像采集与处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
LIU W Y. *Digital Image Collection and Process* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [12] Multiple output sensors seams correction[Z/OL]. <http://www.kodak.com/ek/US/en/MultipleOutputSensorsSeamsCorrection>. [2012-03-13]
- [13] 罗红斌,陈平,顾金良,等. 线阵 CCD 测量系统的镜头畸变校正新方法[J]. 半导体光电, 2009, 30(3): 441-443.
LUO H E, CHEN P, GU J L, *et al.*. A new method of lens distortion calibration of linear CCD measurement system [J]. *Semiconductor Optoe-*

lectronics, 2009,30(3):441-443. (in Chinese)

[14] CIE, Colorimetry(Publication CIE NO 15. 3)[S].

Third edition. Austria: Central Bureau of the CIE. 2004.

作者简介:



赵梓权 (1983—), 男, 四川自贡人, 博士研究生, 2007 年于南京邮电大学获得学士学位, 主要从事 LED 显示理论与色域的研究。E-mail: zhzq169@yahoo.com.cn



汪 洋 (1982—), 男, 吉林人, 博士, 2010 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事 LED 大屏幕亮度均匀性评估等方面的研究。E-mail: clubwy@126.com



郑喜凤 (1965—), 女, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1988 年于吉林大学获得学士学位, 1991 年于中科院长春物理所获得硕士学位, 2000 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事数字信号处理等方面的研究。E-mail: llcfdx@126.com

导师简介:



王瑞光 (1957—), 男, 吉林松原人, 研究员, 博士生导师, 1984 年于长春光机学院(现长春理工大学)获得学士学位, 主要从事 LED 大屏幕平板显示技术、计算机应用等方面的研究。E-mail: wanruiguang1957@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)