

# 基于高动态范围图像的亮度测量方法

田会娟<sup>1,3\*</sup>, 郝甜甜<sup>2,3</sup>, 张辉<sup>1,3</sup>, 牛萍娟<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学电气工程与自动化学院 天津市电工电能新技术重点实验室, 天津 300387;

<sup>2</sup>天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387;

<sup>3</sup>大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心, 天津 300387

**摘要** 研究了一种基于高动态范围(HDR)图像的亮度测量方法。基于数码相机的感光特性及成像原理,采用Photosphere软件将一组低动态范围时间序列图像合成为HDR图像,获取该图像的灰度值并与经线性变换得到的3个刺激值RGB数据进行拟合,得到亮度的计算模型,并对3种背景亮度下标准色板各色块亮度进行计算。研究表明,3种背景亮度下计算得到的标准色板各色块的亮度平均误差在9.22%以内;随着背景亮度的降低,所有色块目标和彩色目标的亮度误差均减小,灰度目标的亮度误差在背景亮度适中时达到最小。

**关键词** 机器视觉;高动态范围(HDR)图像;亮度测量;数码相机

中图分类号 TP391.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.061502

## Luminance Measurement Based on High Dynamic Range Images

Tian Huijuan<sup>1,3\*</sup>, Hao Tiantian<sup>2,3</sup>, Zhang Hui<sup>1,3</sup>, Niu Pingjuan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology,

School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

<sup>2</sup>School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

<sup>3</sup>Engineering Research Center of Ministry of Education on High Power Solid State Lighting Application System, Tianjin 300387, China

**Abstract** Based on the high dynamic range (HDR) image technology, a calculation method for obtaining the luminance parameters is investigated. In this method, according to the photographic characteristics and the imaging principle of digital cameras, a set of low dynamic range time series images is synthesized into a HDR image using the Photosphere software. The gray value of this image is calculated and fitted with the tristimulus value of R, G, B data obtained by linear transformation. And thus the luminance is obtained. The luminance of each color block in the standard color plate is calculated under three background luminance and it is found that the average luminance error is less than 9.22%. Moreover, the luminance errors of all color block targets and coloured targets are reduced with the decrease of background luminance, and the luminance error of the gray targets reaches a minimum when the background luminance is within an appropriate scope.

**Key words** machine vision; high dynamic range (HDR) image; luminance measurement; digital camera

**OCIS codes** 150.0155; 220.2945; 330.7326; 230.6080; 220.4840

## 1 引言

光度参数测量的准确性是评估照明质量和控制的基础。照明研究者一直在寻找一种快速、实用的

方法替代传统逐点测量方法,以实现非均匀场景下的亮度测量。随着数码相机成像质量等性能指标的不不断提升,由数码相机获取低动态数字图像测量照明环境的亮度参数的理论和技术已相对成熟,但是

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-08-15; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61504095)、天津市教委科研计划项目(自然科学)(2017ZD06)、天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)

\* E-mail: tianhjgx@126.com

该方法受显示、打印设备的限制,只能显示 256 个灰度变化,从而导致一些亮度信息丢失。高动态范围(HDR)图像技术采用浮点数据存储,具有比低动态数字图像更大的亮度数据贮存和图像细节显示能力,可真实全面地记录环境中的光信息<sup>[1-3]</sup>。

科研工作者采用电荷耦合器件/互补金属氧化物半导体(CCD/CMOS)数码相机和数据融合技术,获取如非发光表面、光源、窗户和天空等不同目标面的亮度信息<sup>[4-7]</sup>。Moeck<sup>[8]</sup>在相机响应曲线已知情况下,通过 HDR 图像计算亮度值,并与 CCD/CMOS 相机获取的亮度进行对比,结果证实了 HDR 图像在提取亮度信息方面具有优势。Inanici<sup>[9]</sup>通过采用 HDR 图像技术研究了不同光环境下亮度值提取精度和可重复性。Bellia 等<sup>[10]</sup>提出了基于 HDR 图像的视觉分析系统,通过对教学空间场景进行实验测试获得了测试场景的光度参数和几何参数。Cai 等<sup>[11]</sup>采用 HDR 图像技术提取了在不同的孔径、焦距和曝光时间下的亮度参数,研究了不同参数设置对亮度提取结果的影响。使用 HDR 图像提取亮度会受到很多因素的影响,相机的性能(孔径、焦距和曝光时间)以及背景亮度等都会影响测试结果的准确性。

现有研究中,有关背景亮度对 HDR 图像提取亮度精度影响的研究较少。本文提出了一种基于 HDR 图像技术获取亮度参数的计算方法,系统分析了不同背景亮度下标准色板各色块亮度的计算精度。

## 2 HDR 图像亮度计算方法

HDR 图像包含的亮度信息可扩展到人类视觉系统的亮度范围( $10^{-6} \sim 10^8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ),实验采用 Radiance.RGBE 格式进行 HDR 图像的存储<sup>[9,12]</sup>,该格式可实现红 R、绿 G、蓝 B 通道分量值  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  与相应浮点数  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$  分量值的转换,转换关系为

$$\begin{cases} I_r = \frac{X_R}{255} \times 2^{(E-128)} \\ I_g = \frac{X_G}{255} \times 2^{(E-128)} \\ I_b = \frac{X_B}{255} \times 2^{(E-128)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $E$  为指数。基于标准色彩空间(sRGB)<sup>[13-15]</sup>、国际照明委员会(CIE)标准光源 D65 和具有  $2^\circ$  视场的标准 CIE 色度观测器,CIE 1931-RGB 系统 3 个刺激值  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  与 CIE1931-XYZ 系统 3 个刺激

值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  间的映射关系可表示为<sup>[13]</sup>

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2127 & 0.7151 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R \\ X_G \\ X_B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

同时,XYZ 空间与 sRGB 空间之间的标准转换关系式为<sup>[13-14]</sup>

$$\begin{bmatrix} X_R \\ X_G \\ X_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

(1) 式中 HDR 图像灰度值  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$  与 CIE 1931-RGB 系统中的  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  3 个刺激值间的关系可表示为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} X_R = f_r(I_r) \\ X_G = f_g(I_g) \\ X_B = f_b(I_b) \end{cases}. \quad (4)$$

据(1)式和(4)式,可获取函数  $f_r(I_r)$ 、 $f_g(I_g)$ 、 $f_b(I_b)$  的计算模型。

在 1931CIE-XYZ 系统中,CIE-RGB 系统向 CIE-XYZ 系统转换时规定  $Y$  是唯一的亮度度量,因此颜色匹配函数  $\bar{y}(\lambda)$  与明视觉光谱光效率函数  $V(\lambda)$  一致,即  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ <sup>[17]</sup>。因此, $Y$  刺激值与实际亮度  $L_v$  成正比,即  $L_v = k \times (0.2127X_R + 0.7151X_G + 0.0722X_B)$ <sup>[9]</sup>,式中  $k$  为常数,是  $Y$  刺激值与实际亮度  $L_v$  的比例系数。

## 3 实验测试与结果分析

为减少杂散光的影响,提高测试精度,实验在暗室中进行。采用标准白炽灯(功率  $P$  为 300 W,相关色温  $T_c$  为 2701 K)作为环境照明光源,图像拍摄采用佳能 EOS700D 数码相机,配以佳能变焦镜头(EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 IS STM),且固定在三脚支架上,拍摄距离固定为 2 m,相机中心距离地板 1 m,标准色板各色块的实际亮度由光谱辐射度计 PR670 测得,测试时 PR670 的位置与相机的位置保持一致,标准色板距离地面 1 m 且与地面垂直,实验装置示意图如图 1 所示。

通过调节标准白炽灯和标准色板与地面的水平距离改变背景亮度。实验设置了 3 种不同的背景亮度:61.185,25.770,14.150  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。采用 EOS700D 相机拍摄一系列标准色板的低动态范围(LDR)图像,相机曝光时间  $t$  从 2 s 减小至 1/4000 s,其他参数如感光度(ISO)为 1600,光圈数为 5.6,焦距为 55 mm 等信息保持不变,每个背景亮度拍摄 40 张

LDR 图像。背景亮度为  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时的低动态范围图像如图 2 所示。图 3 为在 3 种背景亮度下采用 Photosphere 软件<sup>[9]</sup>合成的 HDR 图像。采用光

谱辐射度计 PR670 测量标准色板各色块的亮度值和 X、Y、Z 3 个刺激值,为减少测试误差,对各个色块进行 3 次重复测量并取其平均值。

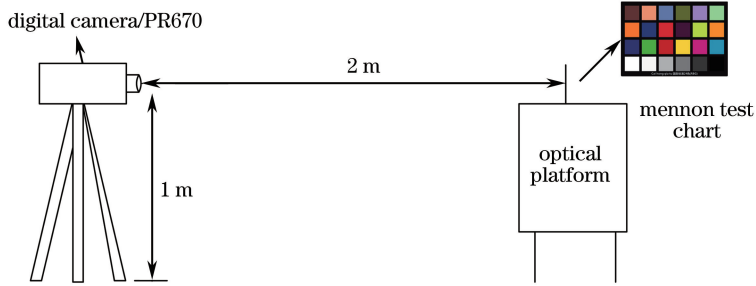


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

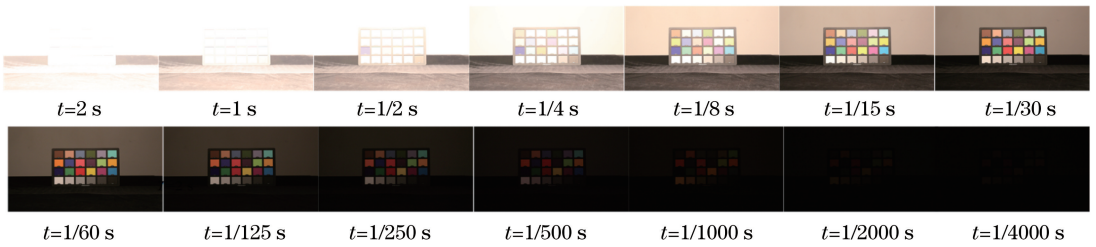


图 2 背景亮度为  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时的低动态范围图像

Fig. 2 LDR images at background luminance of  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

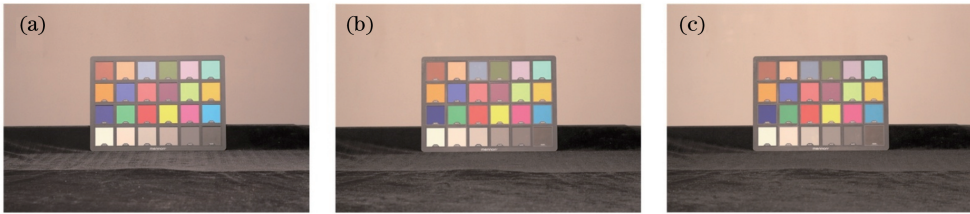


图 3 3 种不同背景亮度下合成的 HDR 图像。(a)  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ; (b)  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ; (c)  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 3 Synthetic HDR images under three different background luminance. (a)  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ;

(b)  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ; (c)  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

将 3 种不同背景亮度下测得的 XYZ 3 个刺激值按(3)式转换为  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  3 个刺激值,并从合成的 HDR 图像中提取各色块的灰度值  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$ ,采用 Origin 软件对计算得到的  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  值与相应的灰度值  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$  进行线性拟合,得到不同背景亮度下,

3 个刺激值与图像灰度值间的关系如图 4~6 所示。由图 4~6 可以看出,  $I_r$ - $X_R$  和  $I_g$ - $X_G$  数据线性拟合度高,其相关系数  $R^2$  在  $0.972\sim 0.989$  之间,  $I_b$ - $X_B$  的线性拟合度较低,相关系数  $R^2$  在  $0.873\sim 0.890$  之间。

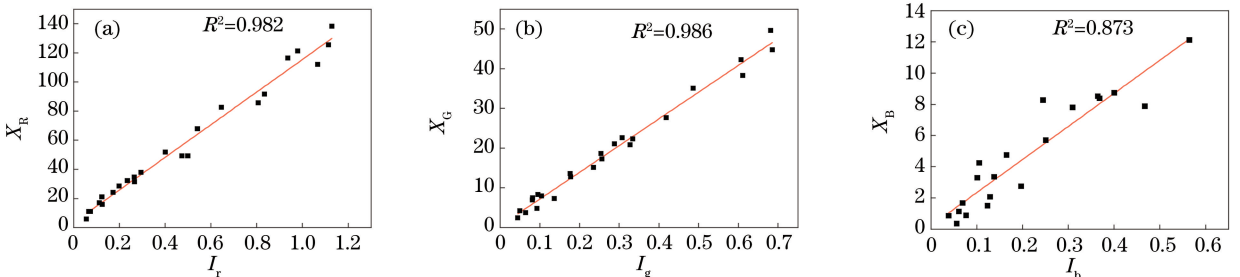


图 4 背景亮度为  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时 3 个刺激值与图像灰度值间的关系。(a)  $I_r$ - $X_R$ ; (b)  $I_g$ - $X_G$ ; (c)  $I_b$ - $X_B$

Fig. 4 Relationship between tristimulus value and gray value of image at background luminance of  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

(a)  $I_r$ - $X_R$ ; (b)  $I_g$ - $X_G$ ; (c)  $I_b$ - $X_B$

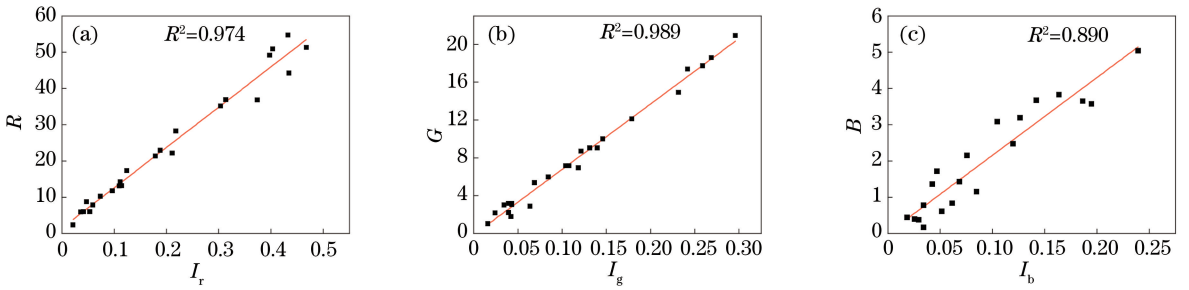


图 5 背景亮度为  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时 3 个刺激值与图像灰度值间的关系。(a)  $I_r-X_R$ ; (b)  $I_g-X_G$ ; (c)  $I_b-X_B$   
 Fig. 5 Relationship between tristimulus value and gray value of image at background luminance of  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

(a)  $I_r-X_R$ ; (b)  $I_g-X_G$ ; (c)  $I_b-X_B$

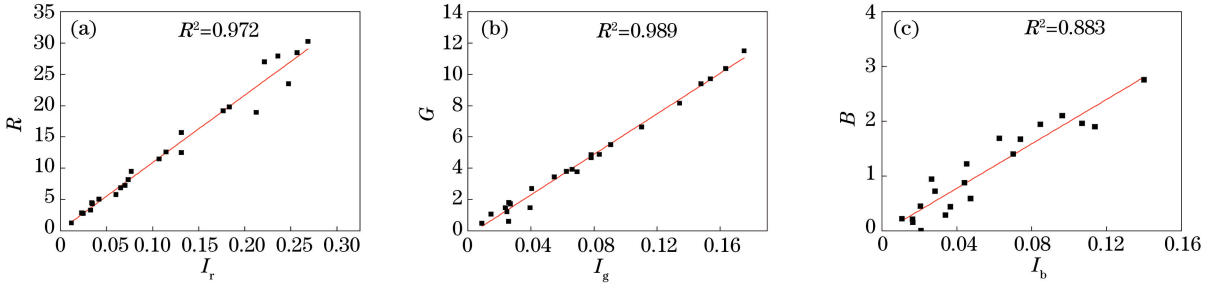


图 6 背景亮度为  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时 3 个刺激值与图像灰度值间的关系。(a)  $I_r-X_R$ ; (b)  $I_g-X_G$ ; (c)  $I_b-X_B$   
 Fig. 6 Relationship between tristimulus value and gray value of image at background luminance of  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

(a)  $I_r-X_R$ ; (b)  $I_g-X_G$ ; (c)  $I_b-X_B$

由图 4~6 中的拟合关系式, 计算得到  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$  值, 利用公式  $L_v = k \times (0.2127X_R + 0.7151X_G + 0.0722X_B)$  计算标准色板各色块的亮度, 因在本实验中 Y 刺激值与亮度值保持一致, 故  $k = 1$ <sup>[18]</sup>。同时采用相对误差分析方法对计算的亮度精度进行分析, 相对误差计算公式为<sup>[19]</sup>

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{|x - x_0|}{x_0} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:  $x$  为被测量的真值;  $x_0$  为测量值。

图 7~图 9 为 3 种背景亮度下各色块亮度和误差

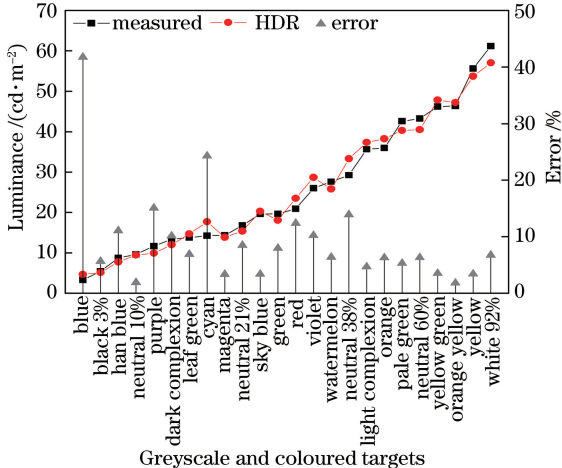


图 7 背景亮度为  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时各色块亮度和误差  
 Fig. 7 Luminance and error of each color block at background luminance of  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

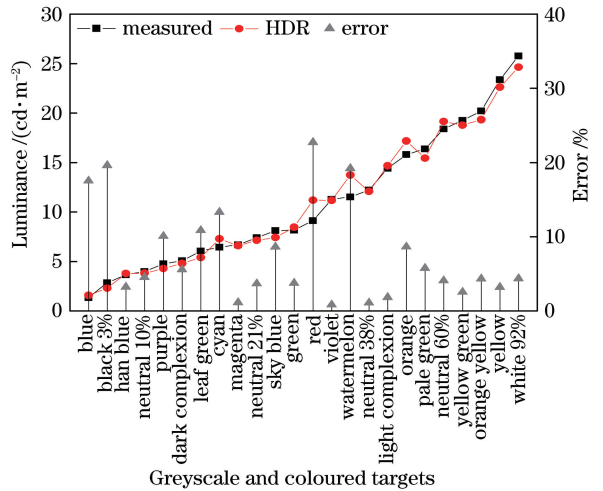


图 8 背景亮度为  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时各色块的亮度和误差  
 Fig. 8 Luminance and error of each color block at background luminance of  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

差。由图 7 可以看出, 当背景亮度为  $61.185 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 该方法提取的各色块亮度的平均误差为  $9.217\%$ , 其中彩色目标的平均误差为  $9.807\%$ , 灰度目标的平均误差为  $7.447\%$ 。由图 8 可以看出, 当背景亮度为  $25.770 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 各色块亮度的平均误差为  $7.529\%$ , 彩色目标的平均相对误差为  $7.960\%$ , 灰度目标的平均相对误差为  $6.238\%$ 。由图 9 可以看出, 当背景亮度为  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时, 各色块亮度的平均误差为  $7.403\%$ , 彩色目标的平均

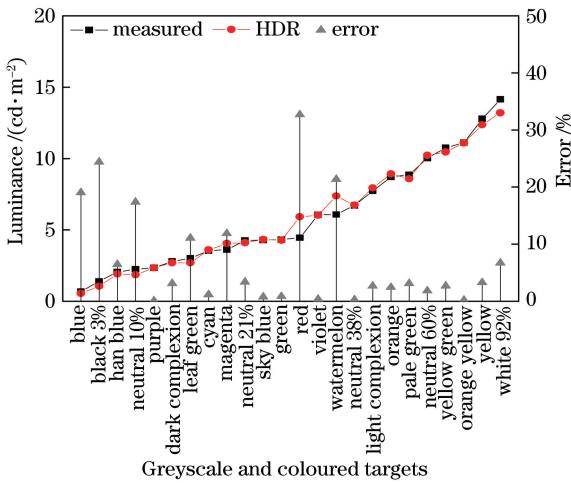


图9 背景亮度为  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  时各色块的亮度和误差  
Fig. 9 Luminance and error of each color block at background luminance of  $14.150 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

误差为 6.865%，灰度目标的平均误差为 9.016%。由上述结果可以得出，随着背景亮度的降低，所有色块目标亮度和彩色目标亮度误差降低，而灰度目标亮度误差则是在背景亮度适中时达到最低值。

## 4 结 论

研究了一种基于高动态范围 HDR 图像技术获取亮度参数的计算方法，分析了不同背景亮度对标准色板各色块亮度计算结果的影响，并与 PR670 测试的亮度进行对比。实验结果表明，随着背景亮度的降低，计算得到的所有色块目标亮度值的准确性提高，各色块亮度平均误差分别为 9.217%，7.529%，7.403%；在 3 种不同背景亮度下计算的标准色板各色块的亮度平均误差在 9.22% 以内，同时彩色目标亮度值的准确性也有所提高，其最小误差为 6.865%；而灰度目标亮度误差则在背景亮度适中时达到最小，即 6.238%。由上述讨论可以看出，背景亮度是影响提取的亮度值准确性的一个重要因素。该方法操作简便、成本低、测试范围广，为室内外照明的亮度测试和眩光分析提供了一定的理论支撑。需要注意的是，为保证亮度的测试精度，当背景亮度变化时需要重新测量 3 个刺激值 XYZ 并计算  $X_R$ 、 $X_G$ 、 $X_B$ 。同时，在研究中发现， $I_b$ - $X_B$  的线性拟合度较低，该问题可能会对后续计算精度造成一定影响，后续工作将对该类问题进行系统的研究和讨论。

## 参 考 文 献

[1] Chen X N, Zhang S F, Lei Z C. High dynamic range

image generation method by fusing multi-level Gamma-transformed images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041014.

陈小楠, 张淑芳, 雷志春. 一种基于多层伽马变换融合的高动态范围图像生成方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041014.

[2] Du L, Sun H Y, Zhang T H, *et al.* Camera response function calibration algorithm based on single frame image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0711003.

都琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于单帧图像的相机响应函数标定算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0711003.

[3] Du L, Sun H Y, Wang S, *et al.* High dynamic range image fusion algorithm for moving targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0410001.

都琳, 孙华燕, 王帅, 等. 针对动态目标的高动态范围图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0410001.

[4] Rea M S, Jeffrey I G. A new luminance and image analysis system for lighting and vision I. Equipment and calibration [J]. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1990, 19(1): 64-72.

[5] Mardaljevic J, Painter B, Andersen M. Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux [J]. *Lighting Research & Technology*, 2009, 41(1): 27-49.

[6] Gayeski N, Stokes E, Andersen M. Using digital cameras as quasi-spectral radiometers to study complex fenestration systems[J]. *Lighting Research & Technology*, 2009, 41(1): 7-25.

[7] Stokes E C, Gayeski N, Andersen M. Estimating spectral information of complex fenestration systems in a video-goniophotometer[J]. *Lighting Research & Technology*, 2008, 40(4): 269-285.

[8] Moeck M. Accuracy of luminance maps obtained from high dynamic range images[J]. *Leukos*, 2007, 4(2): 99-112.

[9] Inanici M N. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system [J]. *Lighting Research & Technology*, 2006, 38(2): 123-134.

[10] Bellia L, Cesarano A, Iuliano G F, *et al.* HDR luminance mapping analysis system for visual comfort evaluation [C] // 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 5-7, Singapore. New York: IEEE, 2009: 957-961.

[11] Cai H, Chung T M. Improving the quality of high

- dynamic range images [J]. *Lighting Research & Technology*, 2011, 43(1): 87-102.
- [12] Larson G W. The LogLuv encoding for full gamut, high dynamic range images [J]. *Journal of Graphics Tools*, 1998, 3(1): 15-31.
- [13] Wang H, Yang J F, Xue B, *et al.* Method for obtaining truth color values based on relative spectral power distribution of light source [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 877-882.  
王红, 杨建峰, 薛彬, 等. 基于光源相对光谱功率分布的颜色真值获取方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 877-882.
- [14] Guo H N, Cao J Z, Zhou Z F, *et al.* Objective evaluation approach of color balance for colorful digital image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(z1): 214-218.  
郭惠楠, 曹剑中, 周祚峰, 等. 彩色数字图像色彩平衡的客观性评价方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(z1): 214-218.
- [15] Guo H N, Cao J Z, Wang H, *et al.* Color management of sRGB color space for HDR digital camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014 (z1): 238-242.  
郭惠楠, 曹剑中, 王华, 等. 高动态范围数字相机 sRGB 色彩空间颜色管理 [J]. *红外与激光工程*, 2014(z1): 238-242.
- [16] Song J Y, Wang L X, Chen Y N. The principles and methods to measuring road lighting by high dynamic image technology [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(2): 21-23, 46.  
宋佳音, 王立雄, 陈燕男. 利用高动态图像技术测量道路照明光度参数的原理及方法 [J]. *照明工程学报*, 2015, 26(2): 21-23, 46.
- [17] Aeronautic Standardization Editorial Department. Engineering psychology analysis and engineering design practice of aircraft cockpit lighting [J]. *Aviation Standardization and Quality*, 1980(s5): 1-188.  
航空标准化编辑部. 飞机座舱照明的工程心理分析与工程设计实践 [J]. *航空标准化与质量*, 1980(s5): 1-188.
- [18] Zhao Z Q, Wang R G, Zheng X F, *et al.* Color gamut correction of LED displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 92-98.  
赵梓权, 王瑞光, 郑喜凤, 等. LED 显示屏的色域校正 [J]. *液晶与显示*, 2013, 28(1): 92-98.
- [19] Yang G Y, Wang J. Predication model error analysis: Relative error and absolute error [J]. *Statistics & Information Tribune*, 2003, 18(4): 21-24.  
杨桂元, 王军. 对预测模型误差的分析: 相对误差与绝对误差 [J]. *统计与信息论坛*, 2003, 18(4): 21-24.