

基于高动态范围成像的极端亮度测量方法研究

秦艳 刘瑞星 康臻 李宏光 宫经珠 孙宇楠 赵俊成

Extreme luminance measurement method based on high dynamic range imaging

QIN Yan, LIU Ruixing, KANG Zhen, LI Hongguang, GONG Jingzhu, SUN Yu'nan, ZHAO Juncheng

引用本文:

秦艳, 刘瑞星, 康臻, 等. 基于高动态范围成像的极端亮度测量方法研究[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 168–174. DOI: 10.5768/JAO202344.0103008

QIN Yan, LIU Ruixing, KANG Zhen, et al. Extreme luminance measurement method based on high dynamic range imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 168–174. DOI: 10.5768/JAO202344.0103008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光大动态范围线性测量

Measurement of absolute linearity using laser covering large-scale dynamic range

应用光学. 2019, 40(4): 681–685 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0407001>

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

基于超连续光源的InGaAs探测器相对光谱响应度定标技术

Relative spectral responsivity calibration technology of InGaAs photodetector based on super-continuum light source

应用光学. 2021, 42(4): 709–716 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403003>

基于蓝光扫描仪的高光面小圆角结构测量方法

Measurement method of high reflective surface and small fillet structure based on blue light scanner

应用光学. 2019, 40(1): 86–92 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103002>

基于后向散射的高浓度纳米颗粒粒度分布测量方法研究

Research on measurement method of size distribution for high-concentration nano-particles based on back scattering

应用光学. 2021, 42(3): 516–521 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303004>

空间激光通信系统动态跟瞄参数测试方法研究

Dynamic tracking and pointing accuracy measurement method of space laser communication system

应用光学. 2018, 39(5): 762–766 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0507002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0168-07

基于高动态范围成像的极端亮度测量方法研究

秦 艳, 刘瑞星, 康 臻, 李宏光, 宫经珠, 孙宇楠, 赵俊成

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为了解决光污染中存在的极端亮度对比问题, 针对此类复杂照明光环境, 提出了一种基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法。利用24色标准色卡和CS-2000分光辐射亮度计对D5300数码相机进行标定, 获得了高动态范围亮度分布图像与CIE 1931-XYZ表色系统刺激值之间的拟合关系, 实现了极端亮度对比环境中亮度分布的准确测量。通过在城市道路中实地测量, 验证了基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法的亮度测量动态范围可达 10^4 , 其测量值与CS-2000分光辐射亮度计测得的标准亮度值的相对误差分别为-2.2%和-2.5%, 表明该方法具有良好的适用性, 可为道路照明质量的高效、高准确度测量提供计量保障, 为有效防治光污染等复杂光环境问题提供了解决方案。

关键词: 亮度; 高动态范围成像; CIE 1931-XYZ表色系统; 计量

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0103008

Extreme luminance measurement method based on high dynamic range imaging

QIN Yan, LIU Ruixing, KANG Zhen, LI Hongguang, GONG Jingzhu, SUN Yu'nan, ZHAO Juncheng
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the problem of extreme luminance contrast in light pollution, an extreme luminance measurement method based on high dynamic range imaging technology was proposed for complex lighting environment. The 24 color standard color card and CS-2000 spectrophotometer were used to calibrate D5300 digital camera, the fitting relationship between the luminance distribution image with high dynamic range and the stimulus value of CIE 1931-XYZ surface color system was obtained, and the accurate measurement of luminance distribution in extreme luminance contrast environment was realized. Through the field measurement in urban roads, it was verified that the dynamic range of luminance measurement of extreme luminance measurement method based on high dynamic range imaging technology could reach 10^4 , and the relative errors between measured value and standard luminance value measured by CS-2000 spectrophotometer were -2.2% and -2.5% respectively. It shows that this method has good applicability, which can provide metrology support for efficient and high-accuracy measurement of road lighting quality, and also provide the solution for effective prevention and control of complex light environment problems such as light pollution.

Key words: luminance; high dynamic range imaging; CIE1931-XYZ surface color system; metrology

引言

高动态范围成像 (high dynamic range imaging, HDRI) 技术在影像制作、虚拟现实、医学检测等领域都有重要的应用, 主要原因是其画面层次比低动态范围图像更丰富, 能够很好地保留复杂照明

场景中高亮度区和低亮度区的细节信息^[1-3], 如今已成为国内外研究热点之一, 并得到了迅速发展。

国外学者对于高动态范围图像技术在光学领域的研究比较系统, 从多方面分析了高动态范围图像作为亮度测量工具的可行性、局限性以及测

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-09-19

基金项目: 装备发展部测试仪器领域项目

作者简介: 秦艳 (1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光辐射计量测试技术方面的研究。E-mail: 335183173@qq.com

量结果的准确性^[3-5]。例如通过 HDRI 摄影获得的亮度分布图,可以根据物体、人物、地面、视觉任务、颜色和亮度进行分析,计算出每个特征贡献的相应照度,并提出了一种测量由特定物体、颜色和特征引起的照度分析方法;探讨了高动态范围成像用于捕获灯具内单个发光二极管亮度的可能性,该研究结果表明,高动态范围成像技术在捕获单个 LED 亮度方面的能力很好^[6-7]。国内学者同样对高动态范围图像技术进行了大量系统的研究,多项研究表明了其应用于亮度测量的可行性和优越性,例如从数码相机的成像原理出发,在光度学和色度学原理的基础上设计了一种利用高动态范围图像提取光环境参数的方法;提出了通过高动态范围亮度分布图像和高动态范围渲染技术对室内照明设计进行分析优化的方法^[8-12]。

由于夜间道路环境中不仅包含较高亮度的光源,而且包括较低亮度的路面,亮度范围可达 10^4 之广,普通数码相机由于光圈、曝光时间等因素的限制使其所获取的图像亮度测量范围有限,常存在过曝光或欠曝光现象,导致部分亮度信息丢失。目前针对夜间道路照明场景中的极端亮度分布情况的检测鲜有公开的研究成果。基于此,本课题提出一种基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法,主要针对道路两侧路灯出光面的平均亮度进行测量,为评价道路照明光环境提供关键数据支撑,进而为道路环境中光污染防治和保障道路交通安全提供了解决方案。

1 高动态范围图像测量原理

1.1 高动态范围图像

高动态范围图像是一种比普通图像可以显示更大动态范围的图像。高动态范围图像在场景的最大亮度值和最小亮度值之间提供更多的亮度级,从而可以记录和显示更大的动态范围和更丰富的图像细节。

高动态范围图像一般通过使用浮点值存储图像亮度数据来增加图像存储的数据量,或者通过使用更大的存储数据宽度(例如: 16 bit 或者 32 bit)来提高图像存储数据的动态范围。例如使用 16 bit 颜色通道进行存储,通过(1)式计算可得其动态范围 D 约为 48 dB,比使用 8 bit 通道存储的图像动态范围增加了 1 倍。

$$D = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (1)$$

式中: D 为动态范围; $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为图像最大亮度值和最小亮度值。

高动态范围图像常见的存储格式有 PFM、Radiance RGBE、FJPEG 等。动态范围可以用来衡量图像的质量,动态范围越大,显示的亮度级别越多,保留的高光区和阴影区的信息越多,包含的场景细节越多。

1.2 测量原理

1) CIE 1931-RGB 表色系统

CIE 在 Wright 和 Guild 的两项颜色匹配实验基础上建立了 CIE 1931-RGB 系统^[13],规定了三原色的波长分别为 700.0 nm(R)、546.1 nm(G)、435.8 nm(B),并选择使用相等数量的三原色匹配出等能白光的方法来确定三刺激值单位。经过实验和计算,最终确定匹配等能白光三原色(R、G、B)单位的光亮度比为 1.000 : 4.590 7 : 0.060 1,辐亮度比为 72.096 : 1.379 1 : 1000。

将 Wright 和 Guild 的实验数据进行转换,转换后的数据一致性较好,取平均值后用来表示人眼的光谱三刺激值,并被命名为“CIE 1931-RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值”。

2) CIE 1931-XYZ 表色系统

为了解决 CIE 1931-RGB 系统中光谱三刺激值和色度坐标存在负值的问题,方便理解和使用,对 CIE 1931-RGB 系统进行了数学转换。采用假想的三原色 XYZ 代替 RGB 三原色^[14],构建新的色度图,使用匹配等能白光确定三刺激值的单位,并将新系统命名为“CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值”。在该系统中,XYZ 三原色可以包括所有颜色,并且规定 X、Z 两原色只代表色度,不表示亮度,亮度只与 Y 有关系。

3) CIE 1931-RGB 表色系统与 CIE 1931-XYZ 表色系统的转换

可通过(2)式将 CIE 1931-RGB 系统三刺激值转化为 CIE 1931-XYZ 系统三刺激值:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4900 & 0.3100 & 0.2000 \\ 0.1770 & 0.8124 & 0.1060 \\ 0.0000 & 0.0100 & 0.9900 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

可通过(3)式将 CIE 1931-XYZ 系统三刺激值转化为 CIE 1931-RGB 系统三刺激值:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3651 & -0.8978 & -0.3817 \\ -0.5160 & 1.4284 & -0.0487 \\ 0.0052 & -0.0144 & 1.0106 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

4) 高动态范围图像亮度测量

本文选用多曝光法获取高动态范围图像,使用数码相机对待测场景以不同的曝光参数拍摄一系列低动态范围图像,将低动态范围图像合成为高动态范围图像,高动态范围图像的保存格式为 Radiance RGBE 格式。

Radiance RGBE 编码是使用整数值对浮点型小数进行编码,每个像素使用 4 个 8 位通道进行保存,其中前 3 个通道分别存储 R、G、B 3 个颜色分量的整数值,第 4 个通道存储指数值 E 。通过(4)式可以获得高动态范围图像的浮点形式的灰度值(R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv}):

$$(R_{gv}, G_{gv}, B_{gv}) = \frac{(R, G, B)}{256} \times 2^{(E-128)} \quad (4)$$

式中: R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv} 分别为 3 个颜色分量的浮点值; R 、 G 、 B 分别为 3 个颜色分量的整数值; E 为 3 个颜色分量的指数值。

因为高动态范围图像的灰度值(R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv})与 CIE 1931-RGB 系统中的三刺激值(R 、 G 、 B)有所差异,所以需要通过实验获得高动态范围图像的灰度值与 R 、 G 、 B 三刺激值的关系,实现将图像灰度值转换为 R 、 G 、 B 三刺激值,进而可以通过(2)式将 CIE 1931-RGB 系统三刺激值转化为 CIE 1931-XYZ 系统三刺激值。

由于 CIE 1931-XYZ 系统中的 Y 刺激值函数与人眼的明视觉光谱光视效率函数相同^[15-18],为了直观表示颜色亮度, CIE 规定 Y 刺激值不仅表示待配色中绿原色的数量,还表示待配色色光的亮度,因

此 Y 刺激值与亮度成正比关系,即:

$$L = kY \quad (5)$$

式中: L 为实际亮度值; k 为比例系数; Y 为 CIE 1931-XYZ 系统的 Y 刺激值。

2 高动态范围图像测量系统

2.1 相机标定

数码相机的性能会直接影响亮度测量结果,为了满足课题的测量要求,所选择的相机应符合以下条件:

1) 数码相机相关参数应具有手动调节功能,可以手动改变曝光时间、光圈大小等参数,便于拍摄一系列曝光参数不同的照片,用于合成高动态范围图像。

2) 数码相机可以记录每幅图像拍摄状态和参数,记录拍摄照片的曝光时间、光圈大小等参数,方便后续计算或合成高动态范围图像。

3) 数码相机曝光范围大,即可以测量的亮度范围大,可以获得强光源或夜间道路的图像信息。

4) 数码相机具有高像素,可以清晰地获得远距离或小面积的目标物体图像信息。

5) 数码相机传感器动态范围大。

6) 数码相机续航能力强,可以满足长时间室外测量工作。

综上所述,本文选择尼康 D5300 搭配腾龙 18-200VC 镜头作为测量设备,所选用数码相机和镜头的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 相机和镜头的主要性能指标

Table 1 Main performance parameters of camera and lens

尼康 D5300+腾龙 18-200VC 镜头				
相机性能	外形尺寸	125 mm×98 mm×76 mm	产品质量	480 g
	传感器类型	CMOS	传感器尺寸	23.5 mm×15.6 mm
	有效像素	2 416 万	最大像素	2 478 万
	曝光模式	自动、手动	白平衡模式	自动、预设
	快门速度	1/4 000 s~30 s, 可以 1/3 eV 或 1/2 eV 为步长调校		
	曝光补偿	可以 1/3 eV 或 1/2 eV 为步长在 -5 eV~5 eV 之间调校		
	ISO 感光度	ISO 100~12 800, 可以 1/3 eV 为步长调校		
	电池类型	锂电池 (EN-EL14a)	续航能力	600 张 (CIPA 标准)
镜头性能	镜头长度	96.7 mm~102 mm	镜头质量	460 g
	镜头直径	68 mm	最大放大倍率	1/3.7 倍
	焦距范围	18 mm~200 mm	等效焦距	27 mm~300 mm
	光圈范围	F3.5~F22	防抖性能	光学防抖

使用已校准的 CS-2000 分光辐射亮度计作为标准器对相机进行标定,如图 1 所示。将 24 色色卡置于桌面或墙上,使色卡垂直于地面,测试时将三脚架分别放在色卡前方 3 m、2 m、1 m 处,调整三脚架高度,分别使相机和 CS-2000 分光辐射亮度计中心与色卡中心等高,开启并等待相机稳定。拍摄前对相机部分参数进行设置:感光度 ISO100、光圈 $F5$ 、设置自动白平衡等。拍摄时,使光圈值和焦点不动,以 $1/3\text{ eV}$ 步长改变曝光时间。

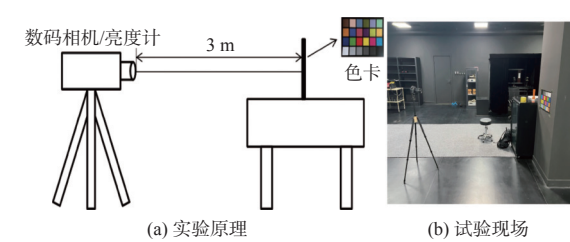


图 1 亮度标定实验

Fig. 1 Luminance calibration experiment

图 2 为三脚架距离色卡 3 m、光圈值 $F=5$ 、曝光时间 $t=(1/25\sim 8)\text{ s}$ 时,相机拍摄的低动态范围图像(由于拍摄图像数量较多,此处只展示部分图像)。

将 CS-2000 分光辐射亮度计置于相同位置的三脚架上,使其在距离色卡 3 m 处测得色卡上选取的 12 个色块的亮度和色度信息,选取色卡上的部分色块,如图 3 所示,其测量数据如表 2 所示。可

表 2 选取色块的亮度和色度信息

Table 2 Luminance and chroma information of selected color blocks												cd/m ²
	色块1	色块2	色块3	色块4	色块5	色块6	色块7	色块8	色块9	色块10	色块11	色块12
亮度	13.67	4.67	10.28	7.92	5.29	12.38	7.83	19.48	7.43	24.06	7.29	2.66
X	13.70	3.83	7.69	8.94	7.08	9.75	4.75	16.88	6.04	23.01	6.95	2.53
Y	13.67	4.67	10.28	7.92	5.29	12.38	7.83	19.48	7.43	24.06	7.29	2.66
Z	10.20	2.25	8.07	2.38	4.27	3.13	2.56	2.57	19.93	25.56	7.60	2.74

将拍摄的不同曝光参数的低动态范围图像合成为高动态范围图像,合成时开启像素对齐、去鬼影等功能,提取合成的高动态范围图像中相应色块的灰度值(R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv}),3 m 处的数据如表 3 所示。分析 CS-2000 分光辐射亮度计获取的色块亮度和色度信息,确定亮度与 Y 刺激值的比例关系。通过(3)式,将亮度计测得的 X 、 Y 、 Z 三刺激值转换为 R 、 G 、 B 三刺激值,3 m 处的数据如表 4 所示。

对 3 m、2 m、1 m 处转换后的 R 、 G 、 B 刺激值

以看出亮度值与 CIE 1931-XYZ 系统的 Y 刺激值相等,所以(5)式中的 k 为 1。

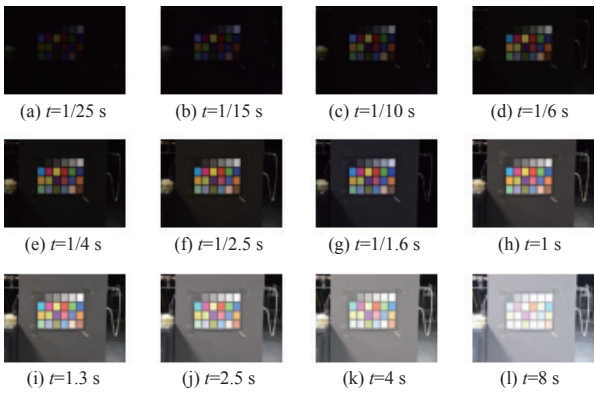


图 2 相机拍摄的低动态范围图像

Fig. 2 Low dynamic range images by camera

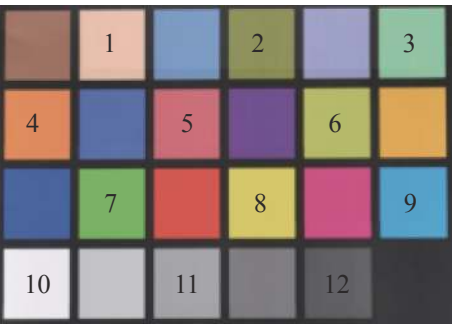


图 3 参数标定选取的色块

Fig. 3 Color blocks selected for parameter calibration

与之前获取的高动态范围图像中对应色块的灰度值 R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv} 进行拟合,去除异常数据后获得拟合函数关系(6)式,拟合图如图 4 所示。

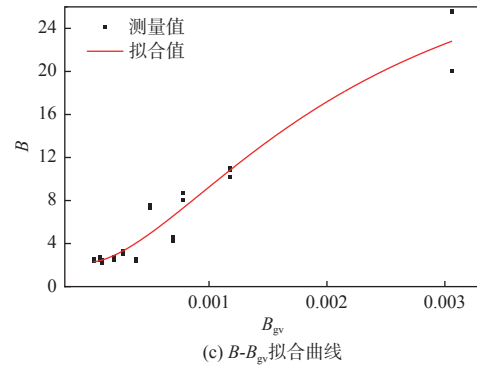
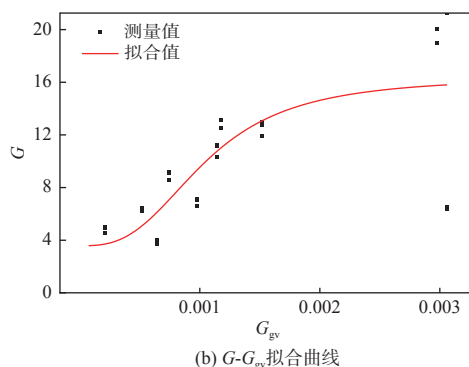
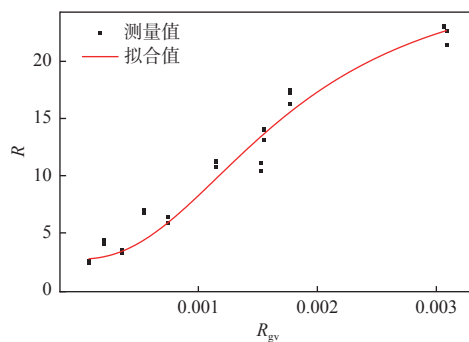
$$\begin{aligned} R &= 2.71 + \frac{25.67 \cdot R_{\text{gv}}^{2.26}}{6.03 \times 10^{-7} + R_{\text{gv}}^{2.26}} \\ G &= 3.58 + \frac{12.8 \cdot G_{\text{gv}}^{2.85}}{3.24 \times 10^{-9} + G_{\text{gv}}^{2.85}} \\ B &= 2.28 + \frac{33.36 \cdot B_{\text{gv}}^{1.61}}{5.61 \times 10^{-5} + B_{\text{gv}}^{1.61}} \end{aligned} \tag{6}$$

表 3 选取色块的灰度值 R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv} Table 3 (R_{gv} , G_{gv} , B_{gv}) gray value of selected color blocks

	R_{gv}	G_{gv}	B_{gv}
色块1	0.001 77	0.001 52	0.001 18
色块2	0.000 21	0.000 21	0.000 09
色块3	0.000 74	0.001 14	0.000 78
色块4	0.001 55	0.000 98	0.000 38
色块5	0.001 53	0.000 64	0.000 69
色块6	0.001 15	0.001 18	0.000 27
色块7	0.000 36	0.000 74	0.000 19
色块8	0.003 09	0.002 98	0.000 02
色块9	0.000 49	0.003 06	0.003 06
色块10	0.003 06	0.003 06	0.003 06
色块11	0.000 54	0.000 52	0.000 50
色块12	0.000 08	0.000 07	0.000 07

表 4 X 、 Y 、 Z 转换为 R 、 G 、 B 的结果Table 4 Results of X , Y , Z converting to R , G , B

	X	Y	Z	R	G	B
色块1	13.70	13.67	10.20	16.24	11.96	10.18
色块2	3.83	4.67	2.25	4.01	4.59	2.22
色块3	7.69	10.28	8.07	5.87	10.32	8.04
色块4	8.94	7.92	2.38	13.11	6.59	2.34
色块5	7.08	5.29	4.27	10.37	3.69	4.28
色块6	9.75	12.38	3.13	10.75	12.50	3.04
色块7	4.75	7.83	2.56	3.23	8.61	2.50
色块8	16.88	19.48	2.57	21.45	18.99	2.41
色块9	6.04	7.43	19.93	-0.01	6.53	20.07
色块10	23.01	24.06	25.56	23.06	21.25	25.60
色块11	6.95	7.29	7.60	6.98	6.46	7.61
色块12	2.53	2.66	2.74	2.55	2.37	2.74

图 4 R 、 G 、 B 三刺激值与 R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv} 灰度值拟合图Fig. 4 Fitting diagram of R , G , B tristimulus values and R_{gv} , G_{gv} , B_{gv} gray values

R - R_{gv} 、 G - G_{gv} 和 B - B_{gv} 拟合关系的判定系数 R^2 分别为 0.942、0.913 和 0.953, 显著性检验 F 分别为 254.152、225.627 和 253.426, 拟合结果比较理想。

2.2 测量流程

高动态范围图像测量系统的测量流程如图 5 所示。首先依据(4)式将采集到的高动态范围图像 (R 、 G 、 B) 转化为灰度值 (R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv}), 其次根据拟合的关系式(6)式将灰度值 (R_{gv} 、 G_{gv} 、 B_{gv}) 转换 CIE 1931- RGB 刺激值, 然后根据(2)式得到 CIE 1931- XYZ 刺激值, 最后依据(5)式得到高动态范围图像亮度值。

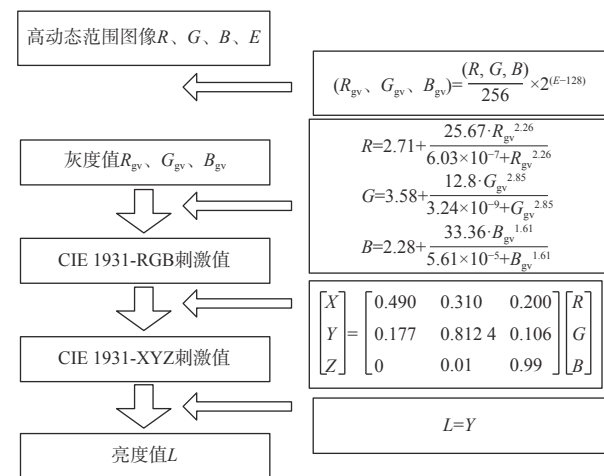


图 5 高动态范围图像测量系统的测量流程

Fig. 5 Measurement process of high dynamic range image measurement system

3 实验与分析

为验证基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法的可靠性和适用性, 分别选择陕西省西安市神舟三路与航天中路的交叉路口、以及神州

大道辅路作为测试地点,使用标定过的数码相机在测试地点道路环境中拍摄一系列不同曝光参数($F=5$, 曝光时间 $1/40\text{ s}\sim 8\text{ s}$)的低动态范围图像,将其合成为高动态范围图像,通过数据处理得到测量环境中的亮度分布,并与 CS-2000 分光辐射亮度计测得的值进行对比,测量结果如表 5 所示。分析表 5 可知,基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法得到的测量值均小于 CS-2000 分光辐射亮度计测得的亮度值,2 个测试地点测试结果相对误差分别为 -2.2% 和 -2.5% ,表明该方法具有较高的可靠性和适用性。

表 5 道路环境中高动态范围亮度测试地点结果

Table 5 High dynamic range luminance test location results in road environment

测量地点	测量设备	亮度值/(cd/m^2)	相对误差/%
神舟三路与航天中路交叉路口	D5300 CS-2000	10189 10423	-2.2
神州大道辅路	D5300 CS-2000	5.13 5.26	-2.5

4 结论

本文提出了一种基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法,利用标定的数码相机作为测量设备,通过数字图像处理技术将测量结果合成高动态范围图像,并提取亮度信息。通过在道路环境中实地测量,验证了基于高动态范围成像技术测量极端亮度的测量范围可达 10^4 ,满足道路环境照明质量的评价需求。同时分析测量数据发现,该测量方法得到的测量值均小于 CS-2000 分光辐射亮度计测得的亮度值,2 个测试地点测试结果与 CS-2000 分光辐射亮度计测得亮度值的相对误差分别为 -2.2% 和 -2.5% ,表明基于高动态范围成像技术的极端亮度测量方法具有较高的可靠性和适用性。

随着高杆照明、护栏照明以及各类交通补光灯的广泛应用,该方法可以提高道路环境照明质量的检测精度与检测效率,为道路照明质量的提升提供计量保障,具有广泛的使用价值。

参考文献:

[1] 何舒文,王延杰,孙宏海,等. 基于DMD的高动态范围场景成像技术[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 99-105.
HE Shuwen, WANG Yanjie, SUN Honghai, et al. High dynamic range imaging based on DMD[J]. Acta Photon-

ica Sinica, 2015, 44(8): 99-105.
[2] YE N J, HUO Y Q, LIU S C, et al. Single exposure high dynamic range image reconstruction based on deep dual-branch network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 9610-9624.
[3] PAN Z Y, YU M, JIANG G Y, et al. Multi-exposure high dynamic range imaging with informative content enhanced network[J]. Neurocomputing, 2020, 386: 147-164.
[4] MOECK M, ANAOKAR S. Illuminance analysis from high dynamic range image[J]. Journal of the Illuminating Engineering Institute of North America, 2013, 2(3): 211-228.
[5] 赵鹏,余新,杨亚涛. 基于光转向的高动态范围激光显示[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 173-180.
ZHAO Peng, YU Xin, YANG Yatao. High dynamic range laser display based on light steering[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 173-180.
[6] MUKHERJEE R, BESSA M, MELO-PINTO P, et al. Object detection under challenging lighting conditions using high dynamic range imagery[J]. IEEE Access, 2021, 9: 77771-77783.
[7] TYUKHOVA Y, WATERS C. An assessment of high dynamic range luminance measurements with LED lighting[J]. LEUKOS, 2014, 10(2): 87-99.
[8] 汪锦航,卢荣胜,刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 145-154.
WANG Jinhang, LU Rongsheng, LIU Duanmao. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 145-154.
[9] 白本督,刘卫华. 高动态范围图像成像技术[J]. 西安邮电大学学报, 2020, 25(1): 63-67.
BAI Bendu, LIU Weihua. High dynamic range image processing[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2020, 25(1): 63-67.
[10] 周林颖,邢冠宇. 一种基于高动态范围(HDR)人脸图片的室外光照估计算法[J]. 现代计算机, 2020(3): 63-68.
ZHOU Linying, XING Guanyu. An algorithm for recovering outdoor illumination information from high dynamic range (HDR) face images[J]. Modern Computer, 2020(3): 63-68.
[11] 曾海瑞,孙华燕,都琳,等. 面向空间目标观测的高动态范围图像合成[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 96-103.
ZENG Hairui, SUN Huayan, DU Lin, et al. High dynam-

- ic range image synthesis for space target observation[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 96-103.
- [12] 冯维, 张福民, 王惟婧, 等. 基于数字微镜器件的自适应高动态范围成像方法及应用[J]. *物理学报*, 2017, 66(23): 127-135.
- FENG Wei, ZHANG Fumin, WANG Weijing, et al. Adaptive high-dynamic-range imaging method and its application based on digital micromirror device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(23): 127-135.
- [13] 黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等. 比较法测试不同颜色匹配函数的性能[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2241-2249.
- HUANG Min, HE Ruili, SHI Chunjie, et al. Test the performances of different color matching functions with the method of comparison[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2241-2249.
- [14] 刘民航. 单脉冲飞秒激光对金属薄膜的微纳加工与颜色显示[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- LIU Minhang. Nanofabrication and coloration of metal film via single-pulse femtosecond laser writing[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [15] 杨超普, 方文卿, 阳帆, 等. 基于光谱分析的明视觉照度传感器设计研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 55-61.
- YANG Chaopu, FANG Wenqing, YANG Fan, et al. Design and investigation on illumination sensors of photopic vision based on spectral analysis[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 55-61.
- [16] NAVARRETE-DE G E, GAGO-CALDERON A, GARCIA-CEBALLOS L, et al. Adjustment of lighting parameters from photopic to mesopic values in outdoor lighting installations strategy and associated evaluation of variation in energy needs[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4089.
- [17] ZANG X L, HUANG L Y, ZHU X N, et al. Influences of luminance contrast and ambient lighting on visual context learning and retrieval[J]. *Attention, Perception and Psychophysics*, 2020, 82(8): 4007-4024.
- [18] LI M, WU P Y, DING J H, et al. The circadian effect versus mesopic vision effect in road lighting applications[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(19): 6975.