

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513679

基于正四面体照度计的全景照度测量方法*

夏岭¹, 胡彩红¹, 刘小峰¹, 孙鹤源², 张鸣杰²

(1. 河海大学人工智能与自动化学院 南京 210098; 2. 常州检验检测标准认证研究院 常州 213000)

摘要:全景照度表征被测量点单位面积上来自三维空间各个方向的平均光通量,在照明质量评估中,对于衡量物体在空间中整体受光照射程度以及人眼接收到的总体光照水平具有重要意义。然而,长期以来,实际测量方法和工具的缺乏使得这一参数测量存在困难。提出一种新方法,通过测量正四面体4个面法线方向上的照度,进一步计算全景照度值。首先,综述了现有的全景照度计算和测量方法;然后,对基于正四面体的全景照度测量方法进行了理论论证;接着,在Laval数据库所包含的2 233张室内场景与205张室外场景的高动态范围全景图像基础上,通过软件仿真的形式进行了超过12万次的测量模拟结果显示,绝对误差在5%以内的测量结果约占96%,平均绝对误差为1.7%,验证了该方法的准确性,并发现测量结果能够随着正四面体照度计摆放姿态的变化保持稳定。最后,提出了正四面体照度计的简易搭建方案,并在4个实际照明环境中进行了测量验证。实验结果表明,基于该测量理论的测量工具易于搭建、测量过程与计算简便,能够较为准确地测量照明空间的全景照度数值,该方法的提出为全景照度的实际测量开辟了一种新的途径。

关键词:照明质量;全景照度;正四面体照度计;高动态范围全景图;亮度校准

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.20 140.3

The measure of panoramic illuminance using a regular tetrahedral illuminance meter

Xia Ling¹, Hu Caihong¹, Liu Xiaofeng¹, Sun Heyuan², Zhang Mingjie²

(1. College of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changzhou Inspection and Testing Standard Certification Research Institute, Changzhou 213000, China)

Abstract: Panoramic illuminance refers to the average luminous flux per unit area received from all directions in three-dimensional space at a given measurement point. It plays a significant role in lighting quality assessment, particularly in evaluating the overall illumination received by objects and the general lighting level perceived by individuals. However, there has been a lack of simple and effective practical measurement tools. This paper proposes a method for measuring panoramic illuminance based on a regular tetrahedral illuminance meter. This method involves measuring the illuminance on the normal directions of the four faces of a regular tetrahedron, allowing for straightforward calculation of the panoramic illuminance value. This study begins by reviewing existing methods for panoramic illuminance calculation and measurement, followed by a theoretical demonstration of the proposed approach. Subsequently, over 120 000 measurement simulations were conducted using software based on 2 233 indoor and 205 outdoor high dynamic range panoramic images from the Laval database. Results show that approximately 96% of the measurements had an absolute error within 5%, with an average absolute error of 1.7%, validating the method's accuracy. Moreover, the measurements remained stable under different orientations of the tetrahedral illuminance meter. Finally, we proposed a simple construction plan for the tetrahedron illuminance meter and verified it in four real lighting environments. Experimental results indicate that tools based on this measurement theory are easy to construct, with a straightforward measurement process and calculation, enabling a relatively accurate measurement of the panoramic illuminance values in lighting spaces. The method has opened up a new approach for the measurement of panoramic illuminance in practice.

Keywords: lighting quality; panoramic illuminance; regular tetrahedral illuminance meter; high dynamic range panorama; luminance calibration

收稿日期:2025-03-24 Received Date: 2025-03-24

* 基金项目:国家自然科学基金项目(62476079)、中国博士后科学基金面上项目(2023M730938)、江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ2024076)资助

0 引言

现代人类的的生活和工作绝大多数时间处于室内环境,人工照明作为自然光的重要补充,不仅为完成视觉作业提供基础,也对人们的睡眠-觉醒周期、免疫力、新陈代谢等生理功能产生重要影响。照度的计算和测量一直是评估室内照明质量的重要手段,它反映了单位面积上接收到的光通量。在各种照明设计标准中^[1-2],规定的水平面照度值成为评估是否满足不同精细程度作业需求的依据。然而,随着人类办公活动从水平到垂直、从纸质到电子载体的转变,以水平面照度作为基准的光环境设计已无法满足新一代照明中“以人为中心的照明”理念。相比于水平照度,全景照度表征了被测点单位面积来自三维空间各个方向上的平均光通量,它不仅反映了物体在空间中被整体照亮的程度,还有效衡量了人在空间中接收到的光照水平,对光环境搭建或改造有重要的指导意义。

然而,全景照度这一指标迄今为止并未在照明质量评估中被广泛采用,主要原因是难以测量,按其定义,需要测量所有方向上的照度值并取平均。为了解决这一问题,Cuttle等^[3-4]设计了一个名为立方体照度计的测量装置。该装置呈立方体形状,每个面都配备有一个照度计。通过对这6个面照度的测量,再利用Cuttle所提计算方法可以近似求得场景中照度标量,即全景照度。但是,这种方法对仪器摆放姿态非常敏感,在2个点光源的照明条件下,最大误差可达33%。为了优化这一问题,Mangkuto^[5]提出了两种基于立方体照度计测量值计算全景照度的替代方法,分别为平均球面半立方体照度法(mean spherical semi-cubic illuminances)和平均球面立方体照度法(mean spherical cubic illuminances)。然而,通过基于多个点光源的模拟计算发现,当点光源数量<6时,提出的替代方法产生的误差较小,但随着点光源数量增加,误差显著。为此,Xia等^[6-7]利用照度分布模型分析了误差产生的原因,并基于600幅高动态范围(high dynamic range, HDR)全景光源的模拟结果进一步提出了基于光照柔和度测量结果的全景照度计算修正方案。

与此同时,Xia等^[8-9]开展了空间光分布(即光场)的视觉感知研究,发现光场分布基于球谐函数分解的零阶分量系数蕴含了光照密度的信息,这构成了利用HDR全景成像技术测量全景照度的理论基础。因为HDR全景图像记录了一个空间中包括亮度分布方向与强度的完整信息。进一步地,基于光场球谐函数分解的测量方案在理论上被证明可以作为全景照度测量的精确方案^[10]。

但是,HDR全景图像的拍摄、缝合、合成及亮度校准过程容易带来附加误差,并且操作步骤多、专业要求高,不易实施。

早在1982年,在《The body at work: Biological ergonomics》^[11]一书中,Boyce首次提及正四面体4个面的平均照度可以近似为照度标量-即全景照度。但此后,由于Cuttle提出的立方体照度计法可以测量全景照度,并且该方法存在的潜在误差直到近年才被深入讨论,因此,鲜有研究对基于正四面体的全景照度测量方法开展进一步探讨或理论证明。本研究将深入论证这一测量理论,并进行正四面体测量全景照度的仿真模拟,误差评估,设计并制作正四面体照度计,最后在实际照明环境中验证其测量效果。

1 全景照度测量方法研究

1.1 基于HDR全景图像球谐函数分解的全景照度计算方法

全景照度被定义为空间中 被测点周围 360° 方向上的照度平均,相比于水平照度、垂直照度等基于某一平面的测量,它反映了空间中更完整的照度分布状况。空间中的光分布是一个有关方向角的亮度分布函数,HDR全景图像经过亮度校准后记录了空间中亮度分布的完整信息,记为 $f(\theta, \varphi)$ 。

球谐函数具有正交完备性与旋转不变性,根据其正交完备性的特点,任意空间亮度分布函数可以使用球谐函数作为基底展开,如式(1)所示。

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_l^m Y_l^m(\theta, \varphi) \quad (1)$$

其中, $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 为球谐基函数, C_l^m 为广义傅里叶系数,可由式(2)计算。

$$C_l^m = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta, \varphi) Y_l^m(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

对球谐基函数 $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 的求解,需要用到Legendre函数,结合拉普拉斯方程,归一化的球谐基函数如式(3)所示。

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = \begin{cases} \sqrt{2} K_l^m \cos(m\varphi) P_l^m(\cos \theta), & m > 0 \\ \sqrt{2} K_l^m \sin(-m\varphi) P_l^{-m}(\cos \theta), & m < 0 \\ K_l^0 P_l^0(\cos \theta), & m = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ 和 φ 为分别为球面坐标系中的仰角与方位角, P_l^m 代表 l 次、 m 阶的Legendre函数,如式(4)所示。

$$P_l^m(x) = \frac{(-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}}}{2^l l!} \frac{d^{l+m}}{dx^{l+m}} (x^2-1)^l \quad (4)$$

当 $m > l$ 时会有 $m + l$ 次导数计算,为简化计算,可以采用递归方式进行求解,如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_m^m = (-1)^m (2m - 1)!! (1 - x^2)^{\frac{m}{2}} \\ P_{m+1}^m = x(2m + 1)P_m^m \\ (l - m)P_l^m = x(2l - 1)P_{l-1}^m - (l + m - 1)P_{l-2}^m \end{cases} \quad (5)$$

此外,在式(3)中比例因子 K_l^m 可以通过式(6)来求解。

$$K_l^m = \sqrt{\frac{(2l + 1)(l - |m|)!}{4\pi(l + |m|)!}} \quad (6)$$

光场球谐函数分解的零阶分量与单位球面上的平均照度(即全景照度或标量照度)有直接关系,全景照度用 E_{scalar} 表示,零阶分量的强度用 $d(E_0)$ 表示,那么它们之间的关系可以进一步推导出式(7)。

$$\frac{E_{scalar}}{d(E_0)} = \frac{E_0}{C_0^0} = \frac{1}{4\pi} \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E(\theta, \varphi) Y_0^0 \sin \theta d\theta d\varphi} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \quad (7)$$

其中, $E(\theta, \varphi)$ 为球面照度分布函数。此外,球面上的照度与亮度分布零阶分量存在关系^[12]: $E_0 = \pi L_0$, 将其代入式(7),得到式(8)。

$$E_{scalar} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} d(E_0) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \pi d(L_0) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} d(L_0) \quad (8)$$

其中 $d(L_0)$ 为全景图像中亮度分布进行球谐函数分解后得到的零阶分量强度,式(8)建立了其与全景照度的直接数学联系。

1.2 基于立方体照度计的全景照度测量方法

Cuttle 等^[2,4]提出了基于立方体6个面法线方向上测量的照度值(即 $E_{x+}, E_{x-}, E_{y+}, E_{y-}, E_{z+}, E_{z-}$)计算全景照度-又称标量照度的方案,如式(9)所示。

$$E_{scalar_cubic} = \frac{|\vec{E}_{vector}|}{4} + \frac{[\min(E_{x+}, E_{x-}) + \min(E_{y+}, E_{y-}) + \min(E_{z+}, E_{z-})]}{3} \quad (9)$$

其中, $\vec{E}_{vector} = (E_{x+} - E_{x-}, E_{y+} - E_{y-}, E_{z+} - E_{z-})$ 。

1.3 基于正四面体照度计的全景照度测量方法

正四面体照度计测量全景照度的方法只需测量4个表面法线方向上的照度值,相比基于立方体照度计的测量方案,所需测量的数据更少。虽然早在1982年 Boyce 就提及了该方法^[11],但从未进行理论验证。

正四面体模型如图1(a)所示,在正四面体每个

表面中心安装一个照度感光探头便构成了正四面体照度计。测量时,不同方向上的入射光 $L(\theta, \varphi)$ 在4个面法线方向上的照度贡献是关于夹角的余弦函数,构成了每个平面的灵敏度曲面方程记为 $S_i(\theta, \varphi)$,如图1(b)所示。

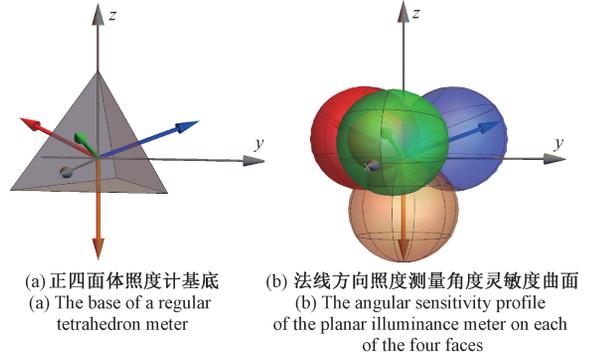


图1 正四面体模型及其照度测量敏感曲面示意

Fig. 1 A regular tetrahedron model and its illuminance measurement surface sensitivity profile

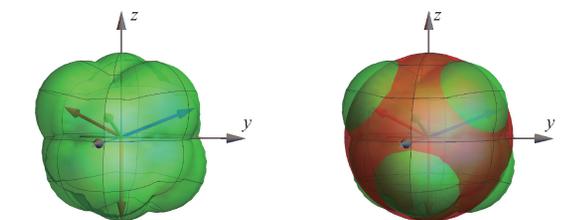
根据照度计算公式,每一个面上的照度测量值 E_{Ti} 遵循式(10)。

$$E_{Ti} = \int S_i(\theta, \varphi) \cdot L(\theta, \varphi) d\Omega, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

正四面体照度计4个面上的照度测量值相加可得式(11)。

$$\sum_{i=1}^4 E_{Ti} = \int \sum_{i=1}^4 S_i(\theta, \varphi) \cdot L(\theta, \varphi) d\Omega \quad (11)$$

其中, $\sum_{i=1}^4 S_i(\theta, \varphi)$ 为图1(b)中4个法线方向灵敏度曲面函数的叠加,如图2(a)所示。由式(11)可知,若叠加后的灵敏度曲面为一个单位球面,那么 $\sum_{i=1}^4 E_{Ti}$ 将是亮度分布在空间所有角度的积分,即等于全景照度。因此,把图2(a)中的叠加灵敏度球面与单位球面相减,得到的差异如图2(b)和(c)所示。经计算,该差异平均值为-0.4%,平均绝对差异值为5%。



(a) 4个面法线方向照度测量角度灵敏度曲面叠加
(b) 叠加曲面与单位球面的差异

(a) The superposed result of the 4 angular sensitivity profile

(b) The difference between the superposed angular sensitivity profile and a unit sphere



(c) 叠加曲面与单位球面的差值
(c) The difference between the superposed angular sensitivity profile and a unit

图 2 正四面体照度计响度曲面叠加与单位球面对比
Fig. 2 Comparison of the superposed result of the 4 angular sensitivity profile of a regular tetrahedron meter with the unit spherical surface

因此,正四面体 4 个面法线方向照度值相加后可以表示为式 (12)。

$$\sum_{i=1}^4 E_{Ti} = \int L(\theta, \varphi) d\Omega + \delta = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi + \delta \quad (12)$$

其中, δ 来自于如图 2(c) 中所示叠加灵敏度曲面与单位球面的差异。因此,4 个面叠加照度与光场分布球谐函数零阶分量的比值可以表示为式 (13)。

$$\frac{\sum_{i=1}^4 E_{Ti}}{d(L_0)} = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi + \delta}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L(\theta, \varphi) Y_0^0(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} = 2\sqrt{\pi} + \frac{\delta}{d(L_0)} \quad (13)$$

进一步地,结合式 (8),可得式 (14)。

$$\sum_{i=1}^4 E_{Ti} = \left(2\sqrt{\pi} + \frac{\delta}{d(L_0)} \right) \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{scalar} = 4E_{scalar} + \delta \quad (14)$$

综上所述,由于 δ 值很小,可得基于正四面体照度计测量的全景照度计算方法如式 (15) 所示。

$$E_{scalar_tetra} = \sum_{i=1}^4 E_{Ti}/4, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

2 实验仿真与误差分析

2.1 基于正四面体照度计测量全景照度的测量仿真

1) 实验方法

采用仿真计算的方法对基于正四面体照度计测量全景照度的方法进行验证。在虚拟环境中放置了一个小型的正四面体模型,把 HDR 全景图像作为光源,通过 HDR 图像的 Y 通道计算出图像的亮度分布信息 L , 单位为 cd/m^2 , 如式 (16) 所示。

$$L = 179 \times (0.2126R + 0.7152G + 0.0722B) \quad (16)$$

根据距离平方反比定律及余弦定律,正四面体上每一个面的法线方向的照度值可根据式 (17) 计算。

$$E = \sum_{i=1}^{Row} \sum_{j=1}^{Column} \frac{L(i, j) \cdot \sin \theta(i, j) \cdot \cos \alpha(i, j)}{R^2},$$

$$0^\circ \leq \alpha(i, j) \leq 90^\circ \quad (17)$$

其中, Row 和 Column 分别代表 HDR 全景图的行分辨率与列分辨率。投影到一个 $R = Row/\pi$ 的球面上(如图 3 所示), $\theta(i, j) = i/R$ 为第 i 行第 j 列像素 $L(i, j)$ 的极角, $\alpha(i, j)$ 代表正四面体上被照射面法线方向与像素 $L(i, j)$ 之间的夹角。

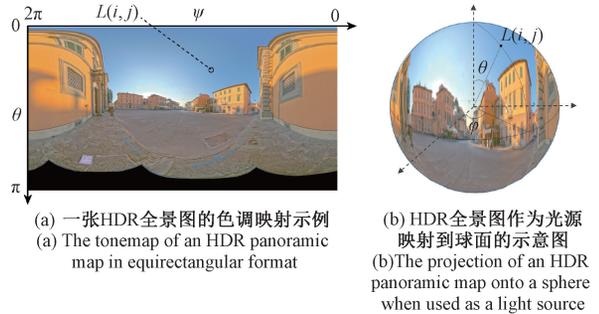


图 3 HDR 全景图到球面的映射示意图

Fig. 3 Illustration of an HDR panoramic map to a spherical surface

仿真实验在 Laval 数据库所包含的 2 233 张 HDR 室内场景与 205 张室外场景下进行,该数据库涵盖了从人工光源到自然光照的众多复杂光照场景。为进一步研究正四面体摆放方向对测量值稳定性的影响,在每张 HDR 全景图像下,正四面体随机旋转 50 个角度,生成 50 种不同的摆放姿态。因此,总共产生了 121 900 个全景照度测量数据。

同时,每一幅 HDR 全景图像作为光源时,在正四面体放置的位置产生的全景照度真实值用 1.1 节所介绍的球谐函数分解法进行计算,记为 E_{True} 。相对误差记为 ε , 如式 (18) 所示。

$$\varepsilon = \frac{E_{Measured} - E_{True}}{E_{True}} \times 100\% \quad (18)$$

2) 实验结果

图 4 描述了基于正四面体照度计测量全景照度的相对误差百分比的分布情况,可见,误差分布绝大部分在 5% 以内。表 1 给出了绝对误差分布的统计分析结果。表明在搜集的 121 900 个测量数据中,绝对误差在 5% 以内的测量结果约占 96%,平均 $|\varepsilon|$ 为 1.7%。这说明基于正四面体照度计 4 个平面的测量结果可以较为准确地恢复全景照度数值。

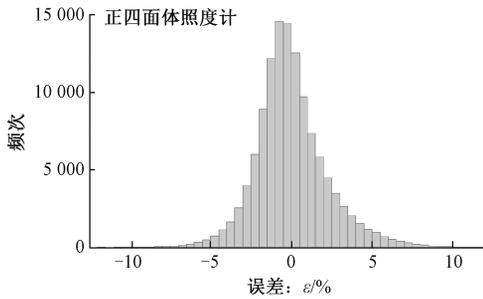


图4 基于正四面体照度计方法的全景照度测量结果误差分布

Fig. 4 Histogram of the relative error percentage ε for the measured scalar illuminance using a regular tetrahedron illuminance meter

表1 基于正四面体照度计测量全景照度的绝对误差分布
Table 1 The error distribution of calculated scalar illuminance using a regular tetrahedron illuminance meter (%)

| 误差 $ \varepsilon $ | 对应占比 |
|--------------------|------|
| 1 | 42 |
| 2 | 70 |
| 3 | 85 |
| 4 | 92 |
| 5 | 96 |

由于在每幅 HDR 全景图像下,正四面体采用了 50 个不同的摆放姿态,产生了 50 个不同的全景照度测量值,可计算出每个测量值与对应的真实值的比值,取其分布的第一四分位数 Q_1 与第三四分位数 Q_3 ,共产生 2 438 组对比数据,其比值的 Q_1 与 Q_3 分布如图 5 所示。可见,对于多次测量的结果,测量值和真实值的比值分布第一四分位数与第三四分位数的关系位于 1 附近,波动范围较小,说明了该测量结果具有较高的鲁棒性。

为了与基于立方体照度计的测量结果进行对比,在每幅 HDR 全景图下又放置了一个立方体照度计,用式 (9) 计算全景照度 $E_{\text{scalar_cubic}}$, 同样生成 50 个位姿以检验其测量鲁棒性。结果表明,基于正四面体照度计的测量结果相比于立方体照度更加稳定(图 5)。

2.2 正四面体照度计实体搭建方法

正四面体照度计搭建方法简便,利用 3D 打印技术打印了边长为 100 mm,壁厚为 2 mm 的正四面体结构,每一面在中心位置留有一个开孔,便于后期安装照度计探头,如图 6(a) 所示。正四面体一个顶角做成平面,并预留走线孔与 1/4 英制螺母预埋便于后期固定在三脚架上。安

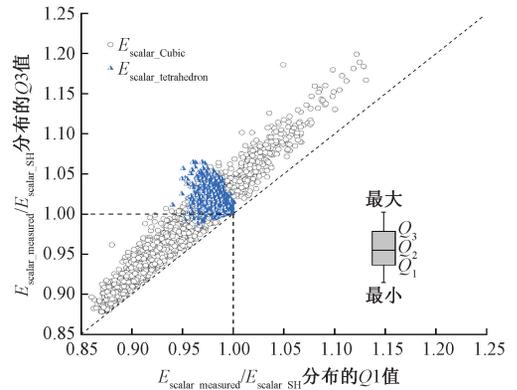


图5 测量结果与真实值比值分布的第一四分位数与第三四分位数关系示例

Fig. 5 Scatter plots between the upper quartile Q_3 and the lower quartile Q_1 of the measured to the true scalar illuminance ratio

装好后,底面朝上,可兼容平面照度与全景照度的测量,如图 6(b) 所示。

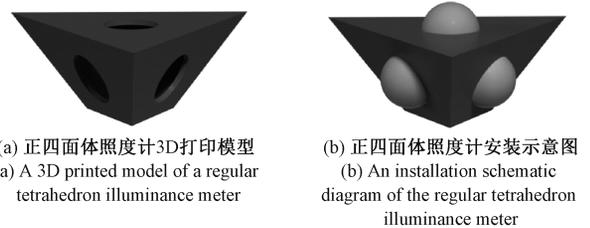


图6 基于 3D 打印的正四面体照度计制作

Fig. 6 3D-printed regular tetrahedral illuminance meter manufacturing

在正四面体照度计搭建过程中采用了 I2C 接口的照度计探头(型号: BH1750FVI),测量范围为 1~65 535 lx,在固定于正四面体模型前,对每个照度计探头都进行了校准,并将校准参数存入嵌入式控制系统。综上,正四面体照度计的制作关键在于能够对正四面体 4 个面法线方向上的照度都进行测量,可以采用 4 个经过校准的照度计探头安装于一个正四面体 4 个平面的形式,也可采用一个照度计探头在 4 个面上轮流测量的方式,形式较为灵活,搭建方法简便。

3 基于正四面体照度计的全景照度实景测量实验

3.1 实验方法与设置

对所提基于正四面体照度计测量全景照度的方法在多个场景下进行验证。其中包括 2 个由人造光源照明的场景(“教室”和“实验室”),均采用色温为 5 000 K 的平

板光源照明,并在夜间拍摄以排除自然光的干扰。另有 2 个场景为具有自然采光窗户的室内环境(“楼梯”和“走廊”),其中楼梯场景配有大面积朝北的落地窗。在各个场景中,均摆放 3 块具有朗博反射特性的标准板,反射率为 20%、50% 和 95%,分别称之为 20% 白、50% 白和 95% 白。

实验流程如图 7 所示,首先,使用 PR670 分光辐射度计测量了 3 个参考样本的物理亮度。然后,使用了一款消费级全景相机(型号:Insta360 One R)通过调节快门速度的方法拍摄一组全景低动态范围(low dynamic range, LDR)图像。再使用 Photomatrix Pro 软件将 LDR 全景图像序列合并成 HDR 全景图片。接着,对比标准板实际测量亮度与 HDR 全景图中对应标准板像素值,对 HDR 全景图进行亮度校准。

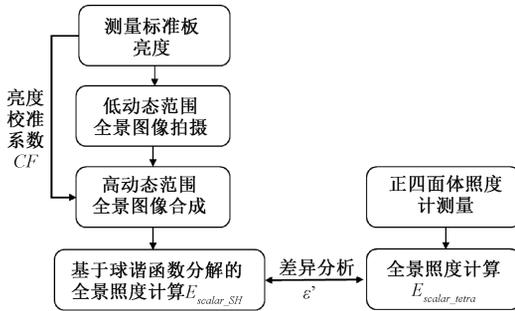


图 7 实际场景测试实验流程

Fig. 7 Procedure of the verification experiments in real scenes

图 8 展示了 4 个场景经过亮度校准后的全景亮度分布伪色图。最后,基于式(8)所示球谐函数分解法计算出全景照度值 E_{scalar_SH} 。

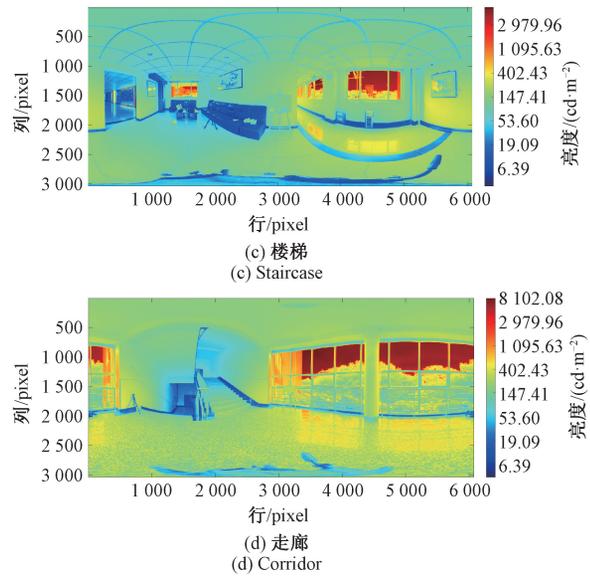
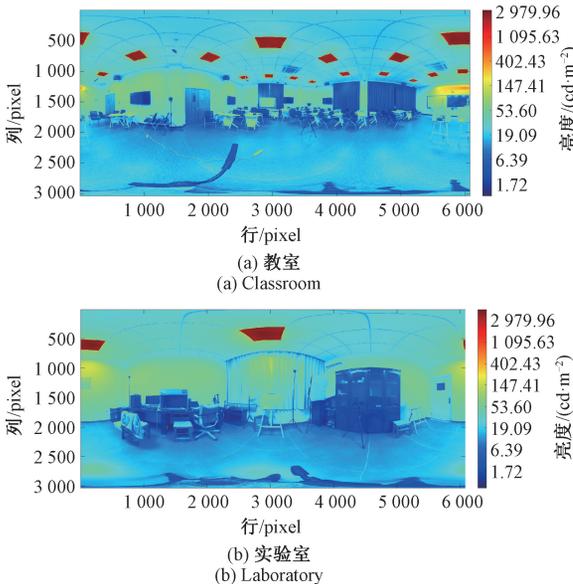


图 8 测试用场景全景亮度分布伪色图

Fig. 8 Pseudo-color map of panoramic luminance distribution in test scenes

同时,通过正四面体照度计测量并计算出全景照度 E_{scalar_tetra} (参照式(15))。在进行场景拍摄和测量时,确保全景相机、分光辐射度计和正四面体照度计都放置在同一位置。

两种方法的测量差异 ε' 通过式(19)进行评估。

$$\varepsilon' = \left| \frac{E_{scalar_tetra} - E_{scalar_SH}}{E_{scalar_SH}} \right| \times 100\% \quad (19)$$

3.2 实验结果

在测试场景中,3 个标准板的亮度实测值与合成的 HDR 全景图中各标准板的像素比值 CF(calibration factor) 用于对合成的 HDR 全景图进行亮度校准。表 2 展示了在 4 个场景中,使用不同标准板时所对应的校准系数 CF。

表 2 不同标准板下 HDR 全景图亮度校准系数 CF

Table 2 Calibration factor CF for HDR panoramas when different reflectance standard boards were used

| 标准板 | 教室 | 实验室 | 楼梯 | 走廊 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 95% 白 | 35.82 | 37.49 | 30.52 | 32.57 |
| 50% 白 | 34.32 | 37.45 | 30.50 | 32.12 |
| 20% 白 | 33.20 | 35.95 | 30.69 | 29.65 |

表 3 列出了基于亮度校准后的 HDR 全景图球谐函数分解法所测得的全景照度值,可见在使用不同标准板对 HDR 全景图进行亮度校准时,全景照度基于球谐函数分解法的计算值 E_{scalar_SH} 之间有一定差异。在“走廊”场景中,当使用 95% 白与 20% 白时,这一差异接近 10%。

表3 基于HDR全景图球谐分解法所得全景照度值

Table 3 Panoramic illuminance values obtained by spherical harmonics decomposition of HDR panoramic images

| | images (lx) | | | |
|--------|-------------|--------|----------|--------|
| | 教室 | 实验室 | 楼梯 | 走廊 |
| 标准板 | | | | |
| 95% 白 | 233.01 | 183.50 | 2 020.90 | 682.24 |
| 50% 白 | 223.25 | 183.30 | 2 019.69 | 672.84 |
| 20% 白 | 215.96 | 175.95 | 2 032.60 | 621.07 |
| 平均全景照度 | 224.07 | 180.92 | 2 024.40 | 658.72 |

表4展示了在各个场景中正四面体照度计所测得4个表面法线方向上的照度值以及全景照度计算结果。

表4 正四面体照度计读数及所测得全景照度值

Table 4 Panoramic illuminance measured by a tetrahedral illuminance meter

| | illuminance meter (lx) | | | |
|-----|------------------------|--------|----------|--------|
| 位置 | 教室 | 实验室 | 楼梯 | 走廊 |
| 面 A | 526 | 450.0 | 3 734 | 682 |
| 面 B | 134 | 101.7 | 608 | 396 |
| 面 C | 112 | 78.7 | 2 437 | 1 432 |
| 面 D | 123 | 111.8 | 2 572 | 324 |
| 全景 | 223.75 | 185.55 | 2 337.75 | 708.50 |

基于HDR全景图亮度校准与球谐函数分解法所求得全景照度与基于正四面体照度计的全景照度测量结果对比差异 ε' 如表5所示。其中,基于球谐函数分解的方法中包含了用3种标准板对HDR全景图进行亮度校准的结果。结果显示,正四面体照度计测得的全景照度与基于球谐函数分解法计算所得全景照度非常接近,尤其在室内环境中,差异均 $<6\%$ 。在拥有大面积落地窗的自然采光“楼梯”场景中,全景照度测量差异接近 15% 。

表5 正四面体照度计与基于HDR全景亮度分布图通球谐函数分解所求得全景照度差异 ε' Table 5 The comparison of panoramic illuminance measured by a tetrahedral illuminance meter and the panoramic illuminance obtained through spherical harmonics decomposition of the HDR panoramic maps, expressed as ε'

| | expressed as ε' (%) | | | |
|------|---------------------------------|------|-------|-------|
| 标准板 | 教室 | 实验室 | 楼梯 | 走廊 |
| 95 白 | 3.97 | 1.12 | 15.68 | 3.85 |
| 50 白 | 0.22 | 1.23 | 15.75 | 5.30 |
| 20 白 | 3.61 | 5.46 | 15.01 | 14.08 |
| 平均误差 | 2.60 | 2.60 | 15.48 | 7.74 |

3.3 结果讨论

基于HDR全景亮度地图球谐函数分解的方法在理论上被证明是计算全景照度的精确方案(见1.1节)。但是,从HDR全景图拍摄与合成到全景亮度地图生成需要经过亮度校准。通用的方法为在场景中放置标准反射板并测量其实际亮度进行对比。之前的研究表明,当环境亮度提高时,采用更高反射率的标准板会带来更小的测量误差^[13]。本实验结果显示,当使用的标准板不同时,得到的HDR全景图校准系数存在较大差异,这验证了不同标准板使用本身会带来误差的可能性。

在比较全景照度基于正四面体照度计测量与基于HDR全景图分解的这两种方法的过程中,发现“教室”、“实验室”这2个人造光源场景,差异较小,都在 6% 以内。对于天然采光中的“走廊”场景,使用20%白作为标准板时,差异较大(14.08%),这个差异极有可能来源于HDR全景图亮度校准时不同标准板使用所带来的误差。对于天然采光中的“楼梯”场景,测量差异都在 15% 左右,由于该场景拥有大面积落地窗,虽然每个场景的亮度测量与照度测量过程都控制在 10 min 以内,但由于云层的移动,光照水平可能会发生了变化。

因此,这项实验证明,在稳定的人工照明环境下,使用正四面体照度计来测量全景照度是一种行之有效的方法。即使在自然光照条件快速变化的情况下,通过对4个面的照度读取,相较于立方体照度计法和HDR全景图拍摄结合基于标准板的亮度校准方法更加快速和便捷。

得益于3D打印技术的灵活性和精确性^[14],搭建正四面体照度计变得简单便捷,尤其是面与面之间夹角的加工精度不再受到传统加工方法的限制。正四面体照度计的长期稳定性和可靠性将主要决定于所使用的照度计光电传感模块。

进一步地,通过正四面体照度计对全景照度的测量具有较大潜力反向应用于HDR全景图的亮度校准中。这种方法可以避免传统亮度校准方法中对昂贵亮度计的依赖和标准板使用时带来的画面干扰问题^[15-16],经过亮度校准的HDR全景图将可以推算出更加精细的照明质量评估参数,有良好的应用前景^[17-19]。

4 结 论

随着光源技术和控制技术的不断进步,现代照明设计灵活性和对空间的可塑性增强,对照明功能的要求变得更加精细化。全景照度作为衡量物体在空间中整体受照射程度以及人在空间中接收到的总体光照水平的参数,目前尚缺乏便捷且准确的实际测量工具。

本研究提出了一种基于正四面体照度计测量全景照度的方法,并首先对该测量方法进行了理论验证。进一步,通过软件仿真方法,在共计2 438幅HDR全景图像下进行了基于正四面体照度计的全景照度测量模拟。同时,利用光场球谐函数分解的方法计算出相应全景照度理论值以供比较。这些HDR全景图展示了不同复杂光照场景,包括人工光照和自然光照。仿真结果表明,正四面体照度计法的测量结果准确(96%的数据误差在5%以内),并且具有较强的鲁棒性。随后,本研究提出了一种基于嵌入式控制系统(如树莓派)、照度探头和3D打印技术的正四面体照度计简易搭建方案,并通过4个实际照明场景对其有效性进行了验证。综上,基于正四面体照度计测量全景照度的方法不仅搭建方便、测量与计算过程简单,并且结果具有较高的准确性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院, 建筑照明设计标准 GB 50034—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020. China Academy of Building Research. Standard for lighting design of buildings: GB 50034—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [2] 中国建筑科学研究院, 建筑采光设计标准. GB 50033—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013. China Academy of Building Research. Standard for daylighting design of buildings: GB 50033—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [3] CUTTLE C. Cubic illumination[J]. *Lighting Research and Technology*, 1997, 29(1): 1-14.
- [4] CUTTLE C. Research note: A practical approach to cubic illuminance measurement[J]. *Lighting Research and Technology*, 2014, 46(1): 31-34.
- [5] MANGKUTO R A. A comparison of three approaches for determining scalar illuminance from cubic illuminance data [J]. *Lighting Research & Technology*, 2019, 51(4): 625-641.
- [6] XIA L, XIAO N, LIU X F, et al. Determining scalar illuminance from cubic illuminance data-Part 1: Error tracing[J]. *Lighting Research & Technology*, 2023, 55(1): 47-61.
- [7] XIA L, GU Y H, LIU X F, et al. Determining scalar illuminance from cubic illuminance data. Part 2: Tests in real lighting environments and an approach to improve its accuracy[J]. *Lighting Research & Technology*, 2023, 55(1): 62-78.
- [8] XIA L, PONT S C, HEYNDERICKX I. Light diffuseness metric Part 1: Theory[J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(4): 411-427.
- [9] XIA L, PONT S C, HEYNDERICKX I. Light diffuseness metric, Part 2: Describing, measuring and visualising the light flow and diffuseness in three-dimensional spaces[J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(4): 428-445.
- [10] 夏岭, 张婷婷, 王雨菡, 等. 全景照度理论及其测量模拟[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 44-49. XIA L, ZHANG T T, WANG Y D, et al. Theory and simulations of measurement of panoramic illuminance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 44-49.
- [11] SINGLETON W T. The body at work: Biological ergonomics [M]. UK: Cambridge University Press, 1982: 347-350.
- [12] RAMAMOORTHI R, HANRAHAN P. On the relationship between radiance and irradiance: Determining the illumination from images of a convex Lambertian object[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(10): 2448-2459.
- [13] MOECK M. Accuracy of luminance maps obtained from high dynamic range images[J]. *Leukos*, 2007, 4(2): 99-112.
- [14] 刘清涛, 魏栋杰, 杨鹏涛, 等. 基于在机测量的曲面共形电路3D打印误差补偿方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(4): 66-74. LIU Q T, WEI D J, YANG P T, et al. Error compensation method for 3D printing of curved conformal circuits based on-machine measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 66-74.
- [15] XIA L, XIAO N, ZHANG T T, et al. The assessment of different calibration strategies on the luminance measurement using high dynamic range images [J]. *Leukos*, 2024: 1-27.
- [16] SAFRANEK S, DAVIS R G. Sources of error in HDRI for luminance measurement: A review of the literature[J]. *Leukos*. 2021, 17(2):187-208.
- [17] 付争方, 朱虹, 薛杉, 等. 基于Sigmoid函数拟合的多曝光图像直接融合算法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(10): 2321-2329. FU ZH F, ZHU H, XUE SH, et al. Direct fusion algorithm for multi-exposure images based on Sigmoid function fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(10): 2321-2329.
- [18] 康晨, 曾丹, 沈洁, 等. 图像融合中的彩色图像颜色校正[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(3): 54-57. KANG CH, ZENG D, SHEN J, et al. Color correction of color images in image fusion[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(3), 54-57.
- [19] 栾添添, 吕春坤, 班喜程, 等. 高动态环境下的傅里叶梅林变换视觉SLAM算法[J]. *仪器仪表学报*, 2023,

44(7):242-251.

LUAN T T, LYU F K, BAN X CH, et al. Fourier Mellin transform visual SLAM algorithm in high dynamic environments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 242-251.

作者简介



夏岭,2009 年于东南大学获得学士学位,2012 年于东南大学获得硕士学位,2016 年获荷兰代尔夫特理工大学博士学位,现为河海大学副教授,主要研究领域为与照明相关的视觉感知、人因工程以及健康照明基于视觉感知的评测机制和调控方法研究。

E-mail:xialing@hhu.edu.cn

Xia Ling received her B. Sc. degree from Southeast University in 2009, received her M. Sc. degree from Southeast University in 2012, and received her Ph. D. degree from Delft University of Technology in 2016. Now she is an associate professor at Hohai University. Her main research interests include visual perception related to lighting, human factors engineering, and the research on evaluation mechanisms and control methods for health lighting based on visual perception.



胡彩红,2022 年于齐齐哈尔医学院获得学士学位,现为河海大学硕士研究生,主要研究方向为照明非视觉效应量化。

E-mail: 371692695@qq.com

Hu Caihong received her B. Sc. degree from Qiqihar Medical University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Hohai University. Her main research is quantification of non-visual effects of lighting environments.



刘小峰,1996 年于山西太原理工大学获得学士学位,1999 年于山西太原理工大学获得硕士学位,2006 年于西安交通大学获得博士学位,现任河海大学人工智能与自动化学学院院长,主要研究领域为人工智能、人机互动,服务型机器人,生物启发的导航技术,神经工程,物联网等。

E-mail:xfliu@hhu.edu.cn

Liu Xiaofeng received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1996, received his M. Sc. degree

from Taiyuan University of Technology in 1999, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2006. He is currently the Dean of the School of Artificial Intelligence and Automation at Hohai University. His main research areas include artificial intelligence, human-computer interaction, service robots, bio-inspired navigation technologies, neural engineering, and the internet of things.



孙鹤源,2013 年于大连工业大学获得学士学位,2017 年于大连理工大学获得硕士学位,现为常州检验检测标准认证研究院/国家半导体照明产品质量检验检测中心(江苏)高级工程师,主要研究方向为照明电器产品和照明现场光环境质量的检验检测。

E-mail:727978762@qq.com

Sun Heyuan received his B. Sc. degree from Dalian Polytechnic University in 2013, received his M. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2017. Now he is a senior engineer at Changzhou Institute of Inspection Testing Standardization and Certification /National LED Products Quality Inspection and Testing Center (Jiangsu). His main research interests include inspection and testing of lighting electrical products and lighting environment quality on lighting sites.



张鸣杰(通信作者),2003 年于盐城师范学院获得学士学位,2008 年于华东师范大学获得硕士学位,现为常州检验检测标准认证研究院/国家半导体照明产品质量检验检测中心(江苏)高级工程师,主要研究方向为照明电器产品和照明现场光环境质量的检验检测。

E-mail:zmjyctc@163.com

E-mail:zmjyctc@163.com

Zhang Mingjie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yancheng Teachers University in 2003, received his M. Sc. degree from East China Normal University in 2008. Now he is a senior engineer at Changzhou Institute of Inspection Testing Standardization and Certification /National LED Products Quality Inspection and Testing Center (Jiangsu). His main research interests include inspection and testing of lighting electrical products and lighting environment quality on lighting sites.