

全景照度理论及其测量模拟

夏岭*, 张婷婷, 王雨菡, 许瑞鹏

河海大学物联网工程学院江苏特种机器人研究重点实验室, 江苏 常州 213022

摘要 不同于传统照明中对平面照度的测量,全景照度是一种对空间中可视物体整体照亮程度进行评价的参数。关于其测量方法,在介绍现有的基于照度计在六个维度上测量数值的近似估算法之外,提出了一种基于高动态范围全景图的亮度分布球函数分解法,并利用球形光源模型对这两种测量方法的准确性进行了比较。结果表明,相比前一种方法,后一种方法具有更强的鲁棒性,并将推动利用身边的数码设备对全景照度进行测量。

关键词 测量; 环境光; 水平照度; 全景照度; 整体照亮程度; 测量方法

中图分类号 TU113.6

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0512002

Theory and Simulations of Measurement of Panoramic Illuminance

Xia Ling*, Zhang Tingting, Wang Yudi, Xu Ruipeng

Jiangsu Key Laboratory of Robotics and Intelligent Technology, College of IoT Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China

Abstract Different from the measurement of plane illuminance in traditional lighting, panoramic illuminance is a parameter that evaluates the overall illumination of visible objects in space. Regarding its measurement method, in addition to introducing the existing approximate estimation method based on the measurement value of a cubic meter in six dimensions, a luminance distribution spherical function decomposition method based on the high dynamic range panoramic image is proposed, and a spherical light source is used to compare the accuracy of these two measurement methods. The results show that, compared with the former method, the latter method is more robust and will promote the use of digital equipment around to measure the panoramic illuminance.

Key words measurement; ambient light; horizontal illuminance; panoramic illuminance; overall illuminance level; measurement method

OCIS codes 120.5240; 150.2950; 230.0040; 330.7325

1 引言

照度作为被照射物体上接收到的光通量的衡量参数,对该物体的可见度起决定作用。我们周围的物体反射接收到的光后以亮度分布的形式进入眼睛^[1],被大脑感知,完成视觉感知过程。电气光源的发展从 19 世纪末期开始,至今已经经历了上百年的历史。自照明行业兴起以来,照度,尤其是水平照度的计算及测量,一直是光度学中的一个重要的研究

课题。在传统照明领域,从最开始关注平面上水平照度分布的均匀性到后来为了完成视觉作业而为每一种作业环境规定最低水平照度值,都彰显着照度在实际照明应用中举足轻重的地位。迄今为止,水平照度仍旧是评价一个环境可见度的重要标准。

如今,随着社会的发展和技术的进步,人们已经不仅仅满足于作业的可见度要求,而更倾向于照明对整个空间中可视物体形态特征的呈现和对整个环境氛围的烘托作用,即进入照明 3.0 时代。而新型

收稿日期: 2020-08-07; **修回日期:** 2020-09-14; **录用日期:** 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61703140)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20170304)、河海大学中央高校基本科研业务费(B210202089)

* **E-mail:** l.xia.cn@outlook.com

的照明技术,特别是 LED 及 OLED 照明技术的发展,使得光的可布置性及可控性更加灵活,从而使这一追求的实现成为可能。

传统照明中对某一个平面照度的测量(譬如水平照度)往往使照明局限于对此平面的照亮程度以及在此平面上视觉作业可完成度的关注上。平均柱面照度的概念虽然被提出,但其局限于对垂直空间中平均照度的测量而大大低估了顶部和底部光源的作用。平均半柱面照度在评价与视线一致水平面上物体的可见度方面有重要贡献,譬如它作为人行道照明中的一个重要指标,对人脸辨别度有重要影响^[2],但是当物体偏离视线水平面时,来自顶部或底部的光线对物体的可见度同样重要。因此,为顺应照明领域的发展和人们对空间照明的新要求,本文提出一种新型环境可见度评价概念——全景照度。某一测量点的全景照度为该点在空间中 360°方向上照度总和的平均。它表征了该点被整体照亮的程

度,是一个独立于观察者的物理量。全景照度的概念之所以一直未被提出和应用,很大程度上是因为利用传统的方法对其进行测量难度较大。本文在提出概念的基础上,将一并介绍一种依托现代技术对全景照度进行测量的方法,并利用光照模型对测量结果进行系统模拟。

2 全景照度与光分布模型

全景照度即一个测量点单位面积上所接收到的来自空间中各个方向的光通量。它的值可被理解为一个圆形球体位于测量点时其所有表面接收到的照度值的平均。但实际测量时,若按照其概念以及传统的照度计测量方法,必须对测量点周围进行 360°无死角测量再取平均,可操作性较弱。为引入新型的测量方法,本文首先介绍 Cuttle^[3]提出的光分布模型的概念。

光分布的三维模型分为亮度分布模型和照度分布模型,如图 1 所示。

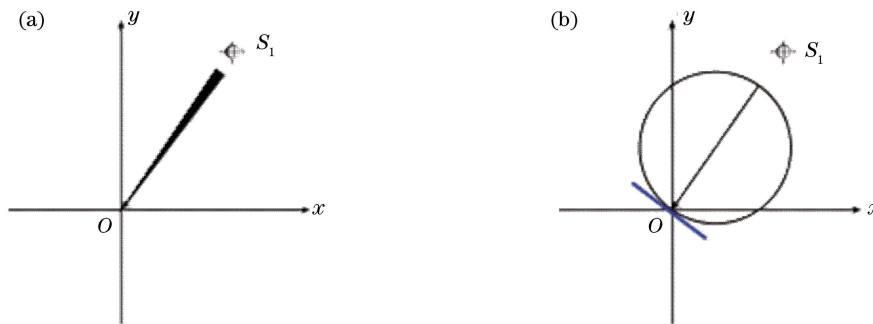


图 1 单一光源在 O 点的光分布模型。(a)亮度分布模型;(b)照度分布模型

Fig. 1 Light distribution model of a single light source at point O . (a) Luminance distribution model; (b) illuminance distribution model

亮度分布模型展示了被测量点周围的亮度分布。在复杂环境中,高动态三维全景图是对被拍照地点亮度分布的完美呈现。图 1(a)展示了一个点光源在黑暗环境中在 O 点的亮度分布。值得注意的是,空间中的亮度分布模型是立体的,在图 1(a)中为了简便,只展示了投影到 xy 平面的部分。光源到点 O 的距离和该方向上的亮度值呈正相关。在此例中,除了光源 S_1 方向,其他任何方向的亮度值都为 0。

照度分布模型描述了被测量点在各个方向上的照度值分布情况。图 1(b)为黑暗环境中,在单一点光源 S_1 照射下, O 点周围的照度分布情况。圆周上的每一点到原点 O 的距离和在此方向上测得的照度值呈正相关。根据余弦定理,在光源 S_1 方向上可以找到照度最大值,在其他方向上照度值根据

测量方向和光源方向的角度呈余弦递减趋势。同样地,该图仅显示了照度在 xy 平面上的分布情况。

亮度是照明中一个很重要的因素,在所有光度量中,它是唯一能够直接引起眼睛视觉感知的量。肉眼根据亮度分布提取出外界的有用视觉信息,加上颜色和时间信息,被 Adelson 等^[4]统称为“plenoptic function”。而照度分布则决定了物体在该测量点的光照情况,对物体的光照外观起主要作用,物体外观再通过表面亮度的形式作用于眼睛^[5],表面亮度的计算式为

$$L = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (1)$$

式中: L 为表面亮度; ρ 为材料的反射系数; E 为材料表面接收的照度。在本文中,照度分布是主要研究对象,我们所要讨论的全景照度就来源于照度分布模型。

图 2(a)展示了在黑暗环境中,两个不同方向上的点光源 S_1 和 S_2 各自的照度分布情况。在图 2(b)中,我们对这两个光源的照度分布进行了叠加,如图中深色实线轮廓所示。叠加后,重叠部分的照度分布矢量根据向量叠加原理如图 2(c)所示。而叠加后的矢量可由一个单一点光源替代,其对应的照度分布如图 2(c)浅色实线圆周所示。在图 2(d)中,深色轮廓代表了图 2(b)中深色实线轮廓(叠加后照度分布)减去图 2(c)中浅色圆周(由叠加矢量对应的照度圆周分布)所剩余部分,可以发现,深色部分轮廓完全关于原点对称,亦称为照度分布中的对称成分。这个原理对于多光源的情况仍然适用。

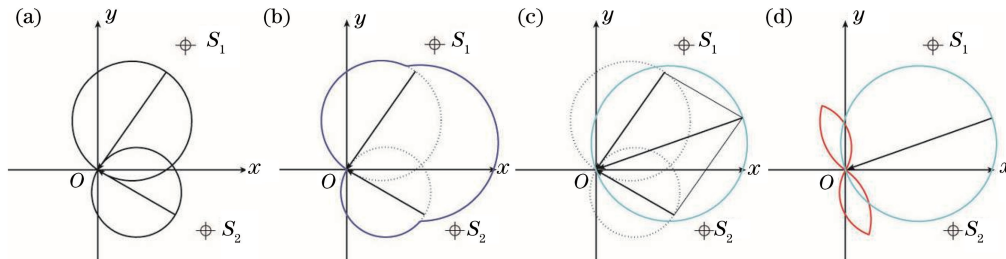


图 2 黑暗环境中,在点光源 S_1 和 S_2 共同作用下的照度分布模型。(a) S_1 和 S_2 分别对应的照度分布模型;(b)深色实线轮廓显示了光源 S_1 和 S_2 照度分布的叠加模型;(c)浅色圆周展示了 S_1 和 S_2 叠加后光照方向的等效照度模型;(d)深色轮廓显示了照度模型中的对称成分

Fig. 2 Illuminance distribution models under the combined action of point light sources S_1 and S_2 in a dark environment. (a) Illuminance distribution models for S_1 and S_2 ; (b) dark solid shape illustrates superposed illuminance model distribution due to S_1 and S_2 ; (c) light circle shows equivalent illuminance distribution of resultant vector component; (d) dark shape illustrates symmetric component of illumination distribution model

3 测量方法

本节主要介绍两种测量原理,一种是由 Cuttle 提出的基于照度计测量值的物理近似法,另一种则是基于光分布的球形函数表达式应用的理论数学方法。随着高动态全景图片拍摄越来越方便,后一种方法有望在今后得到大力推广。

3.1 物理近似法

依据全景照度 E_{scalar} 可被分解为矢量成分 E_{vector} 和对称成分 $E_{\text{symmetric}}$ 两者共同作用的理论,

因此在空间中任何一点的照度分布可以分为矢量成分 E_{vector} 和对称成分 $E_{\text{symmetric}}$ 两部分。而全景照度 E_{scalar} 不仅可以通过计算照度分布在各个方向上的平均值得出,亦可被当作是矢量成分和对称成分共同的作用而成,计算方法为

$$E_{\text{scalar}} = |\mathbf{E}_{\text{vector}}| / 4 + \bar{E}_{\text{symmetric}}, \quad (2)$$

式中: $|\mathbf{E}_{\text{vector}}|$ 可以简单表述为远处单一点光源直射一个具有朗伯表面的小球时其在直射点和背光点照度的最大差值,而小球在单一光源照射下其表面平均照度数值上等于 $|\mathbf{E}_{\text{vector}}| / 4$,详细的证明参见文献[6-7]; $\bar{E}_{\text{symmetric}}$ 为对称分量在小球各方向上的平均。

Cuttle^[7-8] 最先提出了全景照度测量的物理近似法。它利用六个照度计固定于一个正方体的六个面上,由此测得六个方向上的照度值,分别为 $E_{(+x)}$ 、 $E_{(-x)}$ 、 $E_{(+y)}$ 、 $E_{(-y)}$ 、 $E_{(+z)}$ 、 $E_{(-z)}$ 。由这六个测量值,照度分布模型中的矢量成分近似表示为

$$\mathbf{E}_{\text{vector}} = (E_{(+x)} - E_{(-x)}, E_{(+y)} - E_{(-y)}, E_{(+z)} - E_{(-z)}). \quad (3)$$

因此,全景照度可以近似为

$$E = \frac{|\mathbf{E}_{\text{vector}}|}{4} + \bar{E}_{\text{symmetric}} = \frac{|\mathbf{E}_{\text{vector}}|}{4} + \frac{\min(E_{(+x)}, E_{(-x)}) + \min(E_{(+y)}, E_{(-y)}) + \min(E_{(+z)}, E_{(-z)})}{3}, \quad (4)$$

式中: min 指取最小值。

3.2 球函数表达式法

我们知道空间光分布其实是一个有关角度的函数,故可用空间球函数对其进行描述。与一维空间

中的傅里叶级数类似,在三维空间中球函数可以分解为无数个球谐基函数的和,即

$$f(\vartheta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_l^m Y_l^m(\vartheta, \varphi), \quad (5)$$

式中: C_l^m 为系数; $Y_l^m(\vartheta, \varphi)$ 为球谐基函数; l 为球谐函数的阶数, 每一个阶都含有 $2l+1$ 个球谐基函数算子 ($l \geq 0, -l \leq m \leq l$), 如图 3 所示, 深色表示正数值, 浅色表示负数值。第一排为 0 阶分量, 第二排为 1 阶分量, 第三排为 2 阶分量, 以此往下类推。

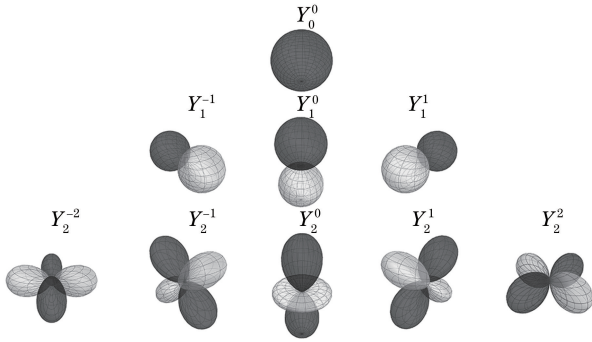


图 3 球谐基函数图示

Fig. 3 Illustration of spherical harmonic basis components

在对亮度分布球谐函数表达式的各阶分量物理意义的研究中可以发现, 0 阶分量包含了平均亮度的信息, 而 1 阶分量则包含了光照方向的信息^[9-10]。由图 1 与图 2 中关于亮度分布和照度分布模型的对应关系可知, 一个亮度分布对应唯一的照度分布, 并且此照度分布同样可以利用球谐函数模型进行分解, 在数值上此照度分布 0 阶分量为对应亮度分布 0 阶分量的 π 倍^[11]。由此推测, 亮度分布的球谐函数分解表达式中, 0 阶分量同样包含了平均照度的信息, 即全景照度的信息。

现实中存在的最亮物体和最暗物体亮度之比为 10^8 左右, 而一般图片只能显示 256 种不同的亮度, 高动态范围图像 (HDR) 通过将多张不同曝光度的照片合成, 可表示的数量级达 10^{16} 甚至更多, 足以表现人们现实生活中照明的动态范围。并且, 图像的灰度与场景中相同点处的亮度之间呈线性关系, 比例用 K 表示。如前所述, 高动态全景图是被拍摄点亮度分布模型的完美呈现, 其亮度信息很容易用球谐函数的方法进行分解。

综上所述, 参考之前的研究^[6, 12] 整理得到全景照度的表达式为

$$E = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} d(E_0) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \pi \cdot d(L_0) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} d(L_0), \quad (6)$$

式中: $d(L_0)$ 为经过 K 值校准后的高动态全景图亮度分布球谐函数表达式的 0 阶分量绝对值。

4 实施方案及测量结果模拟

4.1 测量实施方案

全景照度测量的物理近似法理论基础来源于光分布的照度三维分布模型。它的测量实施必须依靠对空间直角坐标系的三个坐标轴方向上六个面接收到的照度信息进行测量, 即依赖于立方体尺的应用。测得六个面上的照度信息之后就可以快速地利用 (3) 式与 (4) 式对全景照度值进行粗略估算。

全景照度测量的球谐函数表达式法则基于对被测点周围高动态范围全景图的拍摄。高动态范围全景图可以依靠对同一场景拍摄多张不同曝光度的照片进行合并再利用软件对多个角度下拍摄的场景进行全景拼接来完成, 或直接借助于一个全景相机进行拍摄; 亦可借助于一个不锈钢反射小球在不同曝光度下照片的合并和展开得到。高动态范围图所储存的亮度范围非常广, 相比普通图像, 能更完整地记录拍摄环境中的照明信息, 如今很多网站都提供了高动态范围全景图的下载资源。理论上, 场景亮度增加 (或减少), 所拍摄的高动态范围图像中灰度值亦增加 (或减少), 但若具体读出被拍摄环境中的亮度数值, 则需找出高动态范围图像灰度值与场景中真实亮度关系的线性系数 K , 这就需要对拍摄相机进行校准。在得到校准后的高动态范围全景图后, 对其进行球谐函数分解, 提取出 0 阶分量, 全景照度可通过 (6) 式得出。

4.2 测量结果模拟

为了更加系统地检验基于高动态范围全景图球谐函数模型分解的全景照度测量理论, 本文建立了如下模型对测量结果进行仿真。为了方便起见, 假设有一个半径为 1 m 的球形光源, 只有顶部在立体角 α 内部的部分面积发光, 每一个像素的亮度都设为 $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, 如图 4 所示。立体角 α 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间由小到大变化, 共选取了 21 个等级, 随着球形光源内部光场分布的变化全景照度呈逐步增大的趋势。

在图 4(a) 中的球形光源球心处, 放置一个边长为 5 cm 的立方体尺, 利用 Cuttle 提出的物理近似法对全景照度进行模拟计算; 图 4(b) 中, 在球形光源内部放置一个直径为 5 cm 的具有朗伯表面的小球, 由于全景照度的值可理解为一个圆形球体位于测量点时其所有表面接收到的照度值的平均, 故随着角度 α 的改变, 可以计算出球形光源内部小球表面平均照度的变化; 平均柱面照度对评价与视线—

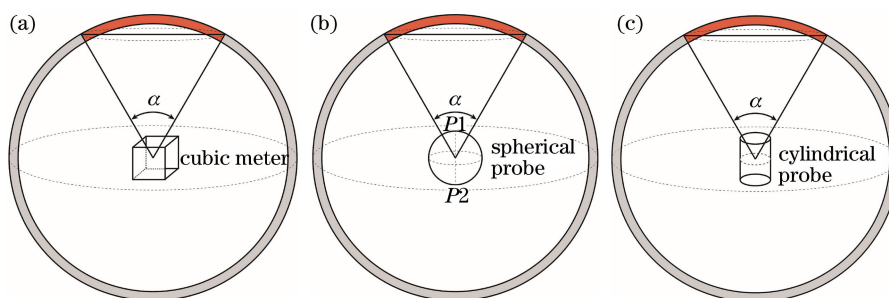


图 4 测量模型。(a) 一个立方体尺在球形光源内部；(b) 一个具有朗伯表面的小球在球形光源内部；(c) 柱面照度计在球形光源内部

Fig. 4 Measurement model. (a) A cubic meter inside a spherical light source; (b) a spherical probe with Lambertian surface inside a spherical light source; (c) a cylindrical probe inside a spherical light source

致水平面上物体的可见度有重要作用,因此,本文在球形光源内部放置了一个圆柱体以模拟不同光照水平下柱面照度的变化,如图 4(c) 所示。除此之外,根据前面的介绍,球形光源发光面积亮度分布实际上就是一张高动态范围全景图,它本身可以利用球函数法分解成(5)式的形式。根据(6)式,全景照度为分解后的 0 阶向量的 $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$ 倍。

α 角从 5° 开始逐渐变化到 360° ,共选取了 21 个等级,计算结果如图 5 所示。 5° 代表了点光源, 360° 代表了完全均匀的光。

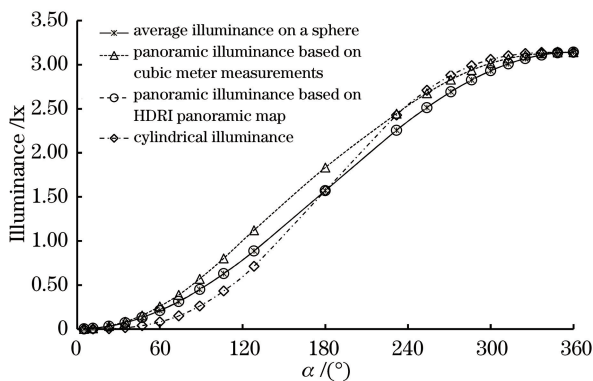


图 5 四种照度模型在球形光源下随着发光立体角变化情况
Fig. 5 Four illuminance models changes with luminescent solid angle under spherical light source

如图 5 所示,基于球函数的全景照度求解法与全景照度理论值完全重合,这说明利用亮度分布的球谐函数分解法来计算全景照度具有可行性以及准确性。基于立方体尺测量值的物理近似法可以在一定程度上反映全景照度的大小,但并不能得到精确值,立方体尺的摆放角度对测量值有较大干扰,在之前的研究中发现,立方体尺的摆放对光照柔和度的测量准确度也有重大影响^[12]。在此模型中,平均柱面照度随着全景照度的增大而增大,但柱状体若非

垂直摆放,则测量值将产生较大改变,同理,若光源并非从顶部向下照射,则亦会对测量值产生较大影响,因此鲁棒性较差。

5 讨 论

本文提出了“全景照度”这一概念对环境光照的充足性进行度量。除此之外,介绍了两种全景照度的测量方法,一种为基于立方体尺的物理近似法,另一种为基于亮度分布的球谐函数分解法。为了对测量结果进行检验,本文建立了一个球形光源的模型。首先,在此模型中,为了简便起见,设定其半径为 1 m,模型的半径并不会对位于球心的照度分布产生影响。这是因为在亮度恒定时,照度的大小和距离的平方成反比,但在本文假设的模型中,相同的发光立体角内,发光面积又和距离的平方成正比。其次,球形光源的模型虽然比较简单,但通过改变立体角的大小可以系统地制造出不同的光照环境来对所提测量理论进行验证,并且有效避免了实际测量中误差带来的干扰。因此,通过模拟仿真的方法来验证测量理论的准确性具有较大的意义。

为了区分全景照度和柱面照度,在球形光源模型中,我们设置了一个圆柱体,其法线方向和光源平均向量平行。虽然柱面照度的值和全景照度变化趋势一致,但是其值受圆柱体的摆放位置影响较大,同样地,当用柱面照度和水平照度之比来衡量另一个光分布的重要参数——建模指数时^[13],柱状照度尺也局限于对顶部光源进行测量。

全景照度的测量方法中,基于立方体尺测量值的物理近似法无论是测量过程还是数据计算都相对简单,虽然测量值会随立方体尺的摆放角度变化,但在精度要求不高且拥有立方体尺这一测试仪器的情况下是一种很好的选择。基于亮度分布的球函数分

解测量法的前提是拍摄测量点周围的高动态全景图并拥有图像灰度值和环境中对对应点亮度之间的比例系数 K 。因此,事先需要对拍摄相机进行校准。但相比于物理近似法,随着高动态范围全景分布图拍摄方法的日趋成熟,本文提出的球谐函数分解法不仅在理论上更精确,而且无需特殊仪器,在可操作性上将更占优势。

在本研究中,为简化计算,利用一个简单球形光源模型对平均柱面照度、全景照度理论值、全景照度物理近似法、全景照度球谐函数法的测量结果进行了模拟。在实际照明环境中,光场分布更为复杂。在接下来的研究中,我们将利用真正的高清动态全景图拍摄方法来研究如何把该方法从理论研究扩展到实际应用中,并有效控制误差,这将是一个有意义的研究内容。

6 结 论

本文提出了一种对环境光照充足性进行评价的新概念——全景照度。不同于照明行业惯用的平面照度,特别是水平照度,全景照度更关注于可视物体在空间中整体被照亮的程度。在提出概念和介绍理论依据的同时,本文对其测量方法进行了介绍和研究。首先分别深入介绍了一种基于立方体照度计测量的近似估算法以及提出了一种基于高动态范围全景图的球谐函数分解法。之后,利用一个球形光源模型对前面介绍的方法进行了测量模拟,结果显示,基于球函数分解的方法具有更高的鲁棒性。与传统的表征空间光照充足性的柱面照度相比,亦有不受测量设备摆放姿态影响的优势。随着高动态范围全景图拍摄技术的发展和成熟,我们期望在不远的将来借助于一部手机就能够快速地完成全景照度的测量。

参 考 文 献

- [1] Li S, Zhang Y N, Wang J, et al. Pupil diameter estimation model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0133002.
李帅, 张宇宁, 王坚, 等. 瞳孔直径估算模型[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0133002.
- [2] Ma Y L, Chen Z L, Hu Y K. The influence of semi-cylindrical illumination to person face identification [J]. *Light & Lighting*, 2008, 32(2): 5-7,12.
马玉琳, 陈仲林, 胡英奎. 半柱面照度对人脸辨识影响[J]. *灯与照明*, 2008, 32(2): 5-7,12.
- [3] Cuttle C. Lighting patterns and the flow of light[J]. *Lighting Research & Technology*, 1971, 3(3): 171-189.
- [4] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. *Computational Models of Visual Processing*, 1991: 3-20.
- [5] Wang F X, Jin C Q, Li X H, et al. Relationship between perceived brightness and chromaticity of laser projection television [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1333001.
王飞霞, 金岑岑, 李晓华, 等. 激光投影电视的感知亮度与色度关系 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1333001.
- [6] Xia L, Pont S C, Heynderickx I. Light diffuseness metric. Part 1: theory [J]. *Lighting Research & Technology*, 2017, 49(4): 411-427.
- [7] Cuttle C. Cubic illumination [J]. *Lighting Research and Technology*, 1997, 29(1): 1-14.
- [8] Cuttle C. Research note: a practical approach to cubic illuminance measurement [J]. *Lighting Research & Technology*, 2014, 46(1): 31-34.
- [9] Xia L, Zhang T T, Liu X F. Validity of deriving low order photometry parameters from light solid distribution [C] // *Proceedings of the Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems*, Chongqing China. New York, NY, USA: ACM, 2019: 143-146.
- [10] Xia L, Tian T, Xu R P, et al. Measuring low-order photometric parameters of light fields: methods exploration and simulations [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 97408-97417.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Hewitt H, Bridgers D J, Simons R H. Lighting and the environment [J]. *Lighting Research and Technology*, 1965, 30(4 IEStrans): 91-116.