

利用数码相机测量亮度分布的实验研究

顾 冰 詹庆旋 祝志强

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘 要: 本文介绍了一种利用数码相机结合计算机图像数据处理技术对亮度分布进行快速测量的方法。实验分析了两台不同的数码相机拍摄的四十多张图像, 以及彩色亮度计测得的近两百个亮度数据, 得到了数码相片的颜色值与实际亮度值之间关系的经验公式。文章给出了近似测量场景的亮度分布的方法, 讨论了经验公式适用性和局限性, 测量得到残差平均值为 0.124 cd/m^2 , 标准估计误差为 3.24 cd/m^2 。上述测量技术将会有较好的实际意义和应用前景。

关键词: 应用光学; 光学; 综述; 数码相机; 亮度测量

Research on Measurement of Luminance Distribution Using a Digital Cameras

Gu Bing Zhan Qingxuan Zhu Zhiqiang

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper describes a method for approximate scene photometry measurement from field based on digital cameras and computer software. The method involves recording the luminance of fields in scenes using a luminance meter at the time images are captured by digital cameras. An empiric formula is developed describing the relationship between the luminance and the color record in the image. The methodology, robustness and limitations of the technique are set out. The average residual of estimate is 0.124 cd/m^2 , and the standard error of estimate is 3.24 cd/m^2 . The technique will have a bright future in application.

Key words: digital camera, measurement of luminance

1 引言

我们要研究体育馆照明的评价, 就需要首先测量体育馆内的亮度分布, 这篇文章所讨论的实验和研究工作就是为照明评价实验研究所作的测量手段上的准备。

传统的彩色亮度计要获得亮度分布的状况, 只能逐点测量, 耗费时间; 如果亮度值随着时间变化, 则无法测量同一时刻的亮度分布。也有专业的光度测量系统可以对较大视野范围进行亮度测量, 但是价格昂贵, 而且一般视野较小, 如没有附加特殊的

装置, 不能胜任大视野范围的测量。

随着数码相机的普及和数码成像技术的提高, 通过对数码图像的处理和分析, 近似测量大范围的亮度分布成为可能。英国有学者提出, 数码相机得到的照片可以用于亮度的近似测量^[1], 本文通过实验给出了实现的方法, 并进行了讨论。

2 原理

亮度物理量是从光通量推导出的, 而光通量的定义基于人眼对于可见光的光谱视效率曲线。这个视效率曲线 $V(\lambda)$ 和色刺激值 Y (和绿色有关) 的

颜色匹配函数 $\bar{y}(\lambda)$ 基本一致。

数码相机实现彩色摄影的方法有多种, 例如给 CCD 器件表面加以彩色滤镜阵列 (CFA: Color Filter Array); 或者使用分光系统将光线分为红、绿、蓝三色, 分别用三片 CCD 接收, 这样就记录下了类似于人眼对于可见光的红、绿、蓝三种颜色的刺激值。可以用类似于颜色三刺激值的公式来表达, 只是将颜色匹配函数 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 替换为数码

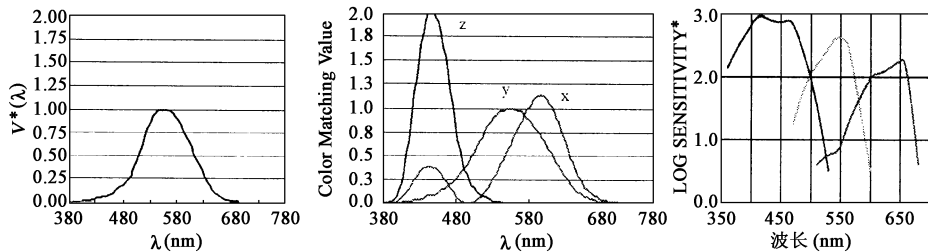


图 1 亮度 L 和 R 、 G 、 B 的关系

比较三个图中的曲线, 数码相机 R 、 G 、 B 的感应函数和颜色匹配函数相似; 又因为色刺激值 Y 的颜色匹配函数和视效率曲线 $V(\lambda)$ 吻合, 所以我们作出这样的假设:

$$g(\lambda) \approx k_1 \cdot \bar{y}(\lambda); \quad \bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$$

$$G = \int g(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \approx k_1 \int \bar{y}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda = k_1 \int V(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \propto L \quad (2-2)$$

即像素点的绿色值 (G) 和实际亮度值近似成正比 (或者其它简单关系的函数)。但实际上, $g'(\lambda)$ 和 $\bar{y}(\lambda)$ 并不一致, 我们用 R 和 B 值修正, 得到更好的相关性:

$$L = f(G + m \cdot R + n \cdot B) \quad (2-3)$$

有文献^[2]认为像素灰度值在一定范围内和曝光量成指数关系。本文不准备这样从理论上分析各自的优劣, 只试图用实验来验证提出的上述假设, 并求出简便适用的经验公式。

3 实验研究的方法

3.1 实验设备

两架数码相机, 一架是佳能 Power Shot G2, 焦距 34mm~85mm, 另一架是带有鱼镜头 EF-C8 的尼康 Cool Pix 995, 视角为 183° 。一架 TOPCON BM-7 彩色亮度计。

3.2 实验过程和数据处理

相机系统里三种颜色值 R 、 G 、 B 对于波长的响应函数 $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, 如式 (2-1)。

$$\begin{cases} R = \int r(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \\ G = \int g(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \\ B = \int b(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2-1)$$

在照明稳定的环境中, 固定观测者位置, 选取多个亮度均匀的小区域 (下文称为“点”), 用亮度计测量它们的亮度; 同时用数码相机在观测者位置用不同的光圈和快门速度拍摄场景, 记录曝光参数。

我们自己编制了应用程序, 可以方便地获得数码相机中任意区域内像素点的平均颜色值 (平均的 R 值、平均的 G 值和平均的 B 值), 利用这个程序记录下每个实际测量过的小区域在照片上对应的颜色值。所有的数据收集整理之后, 借助计算机软件进行分析, 验证前面提出的假设, 如果正确, 可以给出亮度测量的经验公式。这里用到的数据处理和分析软件是 Microsoft® 的 Excel®, Math Works 的 MATLAB® 以及 Oakdale Engineering 的 Datafit®。

4 实验数据分析结果

4.1 实验

夜晚在日光灯照明的办公室内, 用佳能相机固定 35mm 焦距选择了四个场景, 每个场景都分别用了五个不同的曝光参数拍摄照片, 然后选取场景中 48 个亮度较均匀的区域测量亮度值。

把相片按曝光参数分组, 每组中点的亮度同它在图像中 R 、 G 、 B 、 $(R+G)/2$ 、 X_{HSL} 、 X_{HS} 值等六个与颜色有关的指标比较, 其中:

$$X_{HSL} = (R + G + B) / 3 \quad HSL \text{ 颜色空间中}$$

的 Luminosity;

$$X_{HS} = (\max(R, G, B) + \min(R, G, B)) / 2$$

HIS 颜色空间中的 intensity。

分别以这几个指标和实际亮度的关系在图上标出。(下图感光度 100, 快门 40, 光圈 2.8):

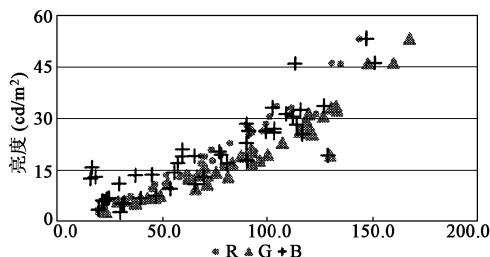


图 2 亮度 L 和 R 、 G 、 B 的关系

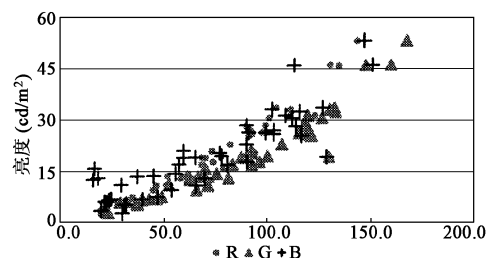


图 3 亮度 L 和 $(R+G)/2$ 、 HIS 、 HSL 的关系

可以看出 G 、 $(R+G)/2$ 、 X_{HSL} 、 X_{HS} 这几个值和实测亮度相关性较大。除去两个数值异常的测点后, 用二次多项式来拟合, 可以看出利用这几个指标作为变量的复判定系数 R^2 均在 0.94 以上, 而且估计值的误差最大也只有 7 cd/m^2 。其它几组不同曝光参数的照片得到的结果都类似, 只是系数会有所不同。所以可以得到结论:

a) 对于相同的曝光参数拍摄的数码照片, 在某个亮度范围内, 象素的颜色值和实际亮度值有很好的相关性。

b) 如果用二次多项式拟合, R 、 G 、 B 中, G 与实际亮度有最好的相关性; 三种综合指标 $(R+G)/2$ 、 X_{HSL} 、 X_{HS} 中, $(R+G)/2$ 与实际亮度有最好的相关性, 曝光参数的改变会影响式中的系数。

4.2 实验二

为了更接近实际的运用, 我们在金卤灯照明的清华大学综合体育馆中做了类似的实验。用配有鱼镜头的尼康数码相机以获取更大的视野; 采用 15 种曝光值以得到曝光参数和亮度的关系。

4.2.1 偏角校正系数

用鱼镜头拍摄时, 对于亮度相同的物体, 在

视野中心所成的像比在视野外围成的像明亮。这是所谓的“晕影效应”^[1], 越靠近图像边缘像素越暗。所以用鱼镜头拍摄的照片来估测亮度时, 需要根据物体离开图像中心的偏角作适当的校正。这个校正系数的函数图 (来源于 Lumetrix 公司 IQCam3 成像光度计产品技术报告), 可以用下式来近似 (θ 为偏离视线中心的弧度)。

$$\begin{cases} Lum' = aX^2 + bX + c \\ Lum = \frac{lum'}{1 - \alpha \cdot \theta^2} \end{cases} \quad (4-1)$$

我们测了体育馆内 48 个点亮度, 对应于不同角度拍摄的照片上的 RGB 和 θ 值, 得到 198 组有效数据, 每组数据都包括实测亮度值、RGB 值和 θ 值。用 Datafit[®] 的拟合, 有角度校正和没有校正的公式, 复判定系数分别为 0.9872 和 0.9844。

4.2.2 曝光参数

当改变光圈和快门时, 象素的颜色值随着射入相机镜头的光通量变化, 而实际的亮度却没有改变, 所以要引入和曝光量有关的系数 $\beta = F^2/T$ 。选取 R 、 G 、 B 值在 5 和 200 之间的数据组, 并在拟合过程中除掉极少的异常点, 一共 520 组有效数据, 利用非线性回归进行拟合, 最后得到的公式形式如下:

$$\begin{aligned} \text{令中间变量 } X &= f \cdot G + (1-f) \cdot R, Y = F^2/T \\ Lum &= \frac{(e+Y)}{(1-d \cdot \theta^2)} (a \cdot X^2 + b \cdot X + c) \end{aligned} \quad (4-2)$$

其中变量 θ 是被测点偏离相机中轴的角度 (单位为弧度), F 是光圈读数, T 是快门速度, G 和 R 分别是象素点颜色的 G 、 R 值; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 都是待定系数,

拟合后得到: $a = 5.98 \times 10^{-6}$, $b = 4.10 \times 10^{-4}$, $c = 5.35 \times 10^{-3}$, $d = 4.55 \times 10^{-2}$, $e = 2.18 \times 10^{+01}$, $f = 0.676$; 复判定系数 $R^2 = 0.9835$; 标准估计误差 $SEE = 3.237 \text{ cd/m}^2$

下图是估计误差的分布, 误差近似符合正态分布。

从实验二可以得到以下结论:

a) 根据象素点在图像上偏离中心的距离进行修正, 能更好的估测实际亮度;

b) 估测实际亮度时, 相机的曝光参数 F^2/T 与实际亮度之间可以用线性关系描述;

c) 公式 (4-2) 可以用于在测量精度要求不甚

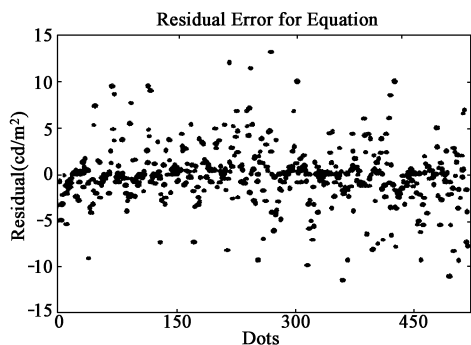


图 4 估计亮度和实际亮度的差值分布

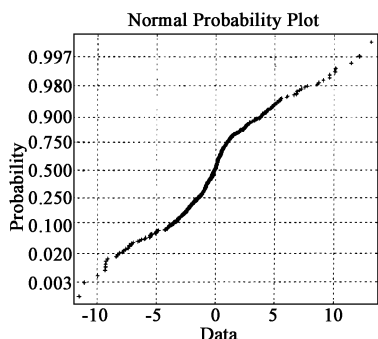


图 5 误差值的正态分布概率散点图

高的研究和应用中的亮度估测。

5 结论与讨论

本文所探讨的测量方法,即用数码相机在一定范围内的测量亮度是可行的,利用公式(5-1)就可以借助数码相机方便迅速的估测场景的实际亮度。

$$X = f \cdot G + (1 - f) \cdot R, \quad Y = F^2 / T$$

$$Lum = \frac{(e + Y)}{(1 - d \cdot \theta^2)} (a \cdot X^2 + b \cdot X + c) \quad (5-1)$$

对于不同的数码相机和相机设定参数,都会影响公式的系数。因为本实验已经根据大量数据验证了这个公式的适用性,所以只须拍摄照片,准确测量少量的区域亮度代入公式,求出 a, b, c, d, e, f 六个系数。使用本文的相机和(4-2)公式的系数,标准估计误差 $SEE = 3.237 \text{ cd/m}^2$

5.1 测量方法的适用性

本文所探讨的方法在进行亮度分布测量时,方便迅速,误差较小,在光环境测量、分析与评价等对精度要求不很高的应用和研究中是非常适用的。

文献[1]、[2]分别认为颜色值和亮度成线性关系和指数关系,用实验二的数据进行检验。线性

拟合的结果不如本文的公式,指数关系拟合的结果与本文近似。

5.2 测量范围

这种测量方法的不足是量程太小,这就造成了很大的限制,能可靠测量的最小值和最大值之间只有不到 40 倍。为了弥补这种缺陷,我们准备采用以下几种方法:

a) 由于指数关系在 R, G 值较大时比公式(4-2)更适合,所以可以考虑结合这两种公式的形式,在 R, G 值不大时用公式(4-2), R, G 值大时用指数关系的公式,扩大测量的范围。

b) 用对同一个场景使用不同的曝光参数拍摄多张照片,将计算结果合并,可以获得更大的测量范围,曝光参数的级数越多,测量范围也就越大。

c) 如果主要是研究高亮度光源,应该直接用亮度计来测量它们的亮度。测量好这些光源的亮度后,再和照片估测的亮度拼合起来,得到完整的场景亮度。

5.3 公式的数值稳定性

如果公式中的变量和系数的微小误差会引起输出数据的很大扰动,这说明公式的数值结果不稳定,是所谓的病态问题。判断函数是否病态,可以用条件数的大小来衡量,条件数越大病态问题越严重。求函数值 $f(x)$ 的条件数 $\text{cond}(f(x))$ 可定义为

$$\text{cond}(f(x)) = \frac{|x \cdot f'(x)|}{|f(x)|} \quad (5-2)$$

当 $\text{cond}(f(x)) \gg 1$ 就认为问题是病态的,这个公式就不适合计算。我们来检验一下经验公式(4-2),把它看成函数:

$$Lum(a, b, c, d, e, f, G, R, F, T, r) = \frac{(e + F^2/T)}{(1 - d \cdot r^2)}$$

$$(a \cdot (f \cdot G + (1 - f) \cdot R)^2 + b \cdot (f \cdot G + (1 - f) \cdot R) + c) \quad (5-2)$$

把得到的系数 a, b, c, d, e, f 代入,并且 G, R, F, T, r 在实际可能的范围内取值,计算函数 $Lum()$ 对于所有这些系数和变量的条件数。我们得到的条件数中,除了 $\text{cond}(Lum(G))$, $\text{cond}(Lum(F))$, $\text{cond}(Lum(r))$ 处于区间(1, 3)内,其它条件数都小于 1。这表明,对于输入变量和待定系数的微小误差,公式(4-2)计算的结果不会有过大的偏差,所以这个公式在数值上是相当稳定的。

(下转第 23 页)

害, 但初制品密度小, 比表面积过大, 因而发光效率受到一定影响, 究其原因, 可能由于燃烧时间过于短促所致。如果开发一种新燃料, 能在目前温度水平上适当延长反应时间, 或可解决这些存在的问题, 这将成为今后努力的方向。

参 考 文 献

- [1] V. Hlavacek, Am. Ceram. Soc. Bull, ' 91, 70 (2): 240.
- [2] А. Г. Мерцанов, цтд. ДАН СССР, ' 72, 206, 833.
- [3] A. Vama, et al. Chem. Eng. Sci., ' 92, 47 (9 ~ 11): 2179.

- [4] P. C. 乔丹著, 宋心琦等译. 化学动力学与传递. 清华大学出版社, 北京: ' 85, p. 244 ~ 278.
- [5] S. R. Jain, et al. Combust. Flame, ' 81, 40, 71.
- [6] L. E. Shea, et al. J. Am. Ceram. Soc., ' 96, 79 (12): 3257.
- [7] M. Kottaisamy, et al. Meter. Res. Bull, ' 96, 31 (8): 1013.
- [8] S. Ekambaran, et al. J. Alloys & Compds, ' 97, 248, 7.
- [9] J. J. Kingsley, et al. J. Solid State Chem, ' 90, 87, 435.
- [10] 郑慕周. 光电技术, ' 01, 42 (1) 47.

(上接第 18 页)

参 考 文 献

- [1] Moore T, Graves H, Perry M J and Carter D J. Approximate field measurement for surface luminance using

a digital camera Lighting Res. and Tech., 2000, 32 (1) 1-11

- [2] 沈天行, 杜江涛. 城市夜景照明的测试技术. 国际夜景照明研讨会, 2001, 上海, P138.

关于规范英文摘要、关键词的通知

根据中国科协科协学发[2002] 054号文“进一步提高期刊学术论文英文摘要的写作质量”的精神, 规范英文摘要的质量标准, 本刊要求来稿作者按以下要求提供英文摘要和关键词。

一、英文摘要

- 1. 英文摘要应用符合英文语法的文学语言, 以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地论述文献重要内容的短文;
- 2. 英文摘要必须符合“拥有与论文同等量的主要信息”的原则, 应重点包括4个要素, 即研究目的、方法、结果和结论;
- 3. 英文摘要的句型力求简单, 通常应有10个意义完整、语言顺畅的句子;
- 4. 英文摘要不应有引言中出现的内容, 也不要讨论论文内容作诠释和评论, 不得简单重复题名中已有的信息; 不用非公知公用的符号和术语, 不用引文, 除非该论文证实或否定了他人已发表的论文, 缩略语、略称、代号, 除了相邻专业的读者也能清楚理解的以外, 在首次出现时必须加以说明; 科技论文写作时应注意的其他事项, 如采用法定计量单位, 正确使用语言文字和标点符号等, 也同样适用于英文摘要的编写。

二、关键词

- 1. 发表在中国科协系统学术期刊中所有学术论文, 必须在摘要后列出不少于4个关键词。从技术角度考虑, 没有关键词的论文应列入非学术论文类。

2. 这些关键词按以下顺序选择:

第一个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标GB/T 13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等, 此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文, 此处不写被研究的方法名称, 而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词中没有出现的, 但被该文作为主要研究对角的事或物质的名称, 或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要, 第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

《照明工程学报》