

投影显示亮度均匀性稳健校正方法

陶 奇¹ 徐海松¹ 邹文海¹ 余培英²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; ² 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203)

摘要 随着投影仪的发展,其显示质量越来越受到人们关注。投影显示中普遍存在亮度不均匀性问题,且大部分高灰度图像在亮度校正后易出现饱和。而一般的剪切法会极大地降低像面均匀性。为解决这个问题,基于投影仪相机系统建立系统光度学模型,在传统线性映射方法的基础上提出了一种亮度不均匀性校正的非线性稳定算法。实验表明,采用的投影仪在校正前其图像显示亮度从中心到边缘下降了近 50%,像面不均匀性的相对均方根误差(RRMS)为 17.7%;而饱和图像校正后像面的 RRMS 为 1.69%,几乎达到了与未饱和图像(1.55%)相同的校正精度,同时基本保持了显示图像的平均亮度水平。

关键词 投影显示; 亮度均匀性校正; 投影仪相机系统; 饱和补偿

中图分类号 TH741.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0918

Robust Correction Method for Projection Display Luminance Uniformity

Tao Qi¹ Xu Haisong¹ Zou Wenhai¹ Yu Peiying²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

² Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China

Abstract With the development of projectors, the display quality has been widely concerned. The luminance uniformity is a common problem in projection display. Most images with high gray value tend to saturate after uniformity correction, while the common clipping method will decrease the uniformity greatly. In order to solve this problem, a photometric model based on projector-camera system was set up, and then a robust nonlinear algorithm for luminance uniformity correction was proposed on the basis of the traditional linear mapping method. The experimental results indicate that the display luminance of the projector is decreased by 50% from center to edge, corresponding to the relative root mean square (RRMS) error of luminance uniformity of 17.7%. After luminance correction, the RRMS value of saturated images decreases to 1.69%, almost as good as that for nonsaturated images (1.55%), while the average luminance level is well preserved in general.

Key words projection display; luminance uniformity correction; projector-camera system; saturation compensation

1 引 言

随着便携式投影仪的发展,投影显示的应用越来越广泛,显示图像的质量受到人们普遍重视^[1,2]。颜色再现特性的空间不均匀性是影响投影显示图像质量的主要因素^[3]。研究表明^[4],投影仪尤其是多投影仪显示图像颜色的空间不均匀性主要是由于亮

度分量空间变化引起的。相对而言,色度分量在同种投影仪显示域内基本保持不变,且随显示参数的改变其变化很小^[5]。同时,人眼视觉系统对亮度差异的敏感性远大于色度分量,因此投影仪显示亮度均匀性校正具有重要的现实意义。

传统投影显示亮度分布校正方法采用高精度辐

收稿日期: 2008-06-30; 收到修改稿日期: 2008-09-25

作者简介: 陶 奇(1985—),男,硕士研究生,从事数字图像处理,计算机视觉,颜色管理等方面的研究。

E-mail: Thinkbig.OP@gmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授、博导,主要从事颜色与影像科学、光度学、色度学、光辐射测量等方面的研究。

E-mail: chsxu@zju.edu.cn

射度计对单个局部区域逐次测量,成本高、工作量大,随着投影仪分辨率的提高已不能满足像素级水平的投影显示应用要求。于是,Aditi Majumder 等人提出利用相机作为像面亮度均匀性的评价手段以达到像素级的精度^[5],在假定投影仪亮度响应呈线性的前提下建立亮度不均匀性的线性映射校正算法。但是,该方法并没有考虑到投影仪输入的有限动态范围以及输入图像的内容,故不适用于灰度较高的输入图像。为此,本文结合投影仪相机系统的特点,提出一种亮度不均匀性校正的鲁棒方法。实验证明,本方法在有效处理饱和溢出而导致均匀性下降的同时,基本保持了显示图像的平均亮度。

2 实验系统及研究方案

如图 1 所示,投影仪相机系统^[6]主要由投影仪 NEC-LT30+、相机 Hitachi HV-D30 和计算机三部分组成。计算机中的原始图像首先由投影仪投射到屏幕,经屏幕反射后被相机捕获,再由采集设备对捕获图像处理后输出到计算机,经过计算机处理得到的补偿图像再次交由投影仪投影,构成一个闭环系统^[7]。对应用于投影显示亮度校正的投影仪相机系统,本文的研究和讨论基于以下假设:

- 1) 实验用显示屏满足理想均匀漫反射条件。
- 2) 投影仪和相机像面上空间各点传输特性一致。
- 3) 相机光圈设定小于 F8 时,渐晕效应可以忽略^[4]。
- 4) 投影仪和相机均只有 R、G、B 三个颜色通道及 8 位量化级。
- 5) 采用结构光技术^[8]已建立投影仪输入和相机输出图像的几何映射关系。

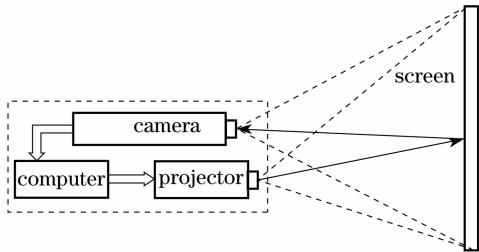


图 1 投影仪相机系统的基本组成

Fig. 1 Configuration of projector-camera system

2.1 光度学模型

在几何映射的基础上,记 r, g, b 为投影仪和相机的通道数字值, Y, C 为分别表示亮度和色度分量的颜色显示属性值。如图 2 所示,输入一幅颜色值

为 $\mathbf{I}_{in}(x_i, y_i)$ 的图像,其中 $\mathbf{I}_{in} = [r_i, g_i, b_i]^T$;经投影仪响应传输函数 f_p 输出 $\mathbf{I}_p(x_i, y_i) = f_p[\mathbf{I}_{in}(x_i, y_i)]$,其中 $\mathbf{I}_p = [Y_p, C]^T$;然后, \mathbf{I}_p 的亮度分量受到空间变化 $P(x_i, y_i)$ 的调制即 $L_c = Y_p * P(x_i, y_i)$,并经屏幕反射后得到 $\mathbf{I}_c(x_i, y_i)$,其中 $\mathbf{I}_c = [L_c, C]^T$;最后,反射量 \mathbf{I}_c 由相机响应函数 f_c 处理后输出 $\mathbf{I}_{out}(x_m, y_m)$,即 $\mathbf{I}_{out}(x_m, y_m) = f_c[\mathbf{I}_c(x_i, y_i)]$,其中 $\mathbf{I}_{out} = [r_m, g_m, b_m]^T$ 。因此,投影显示亮度均匀性校正的关键是获得响应函数 f_c 和 f_p 。

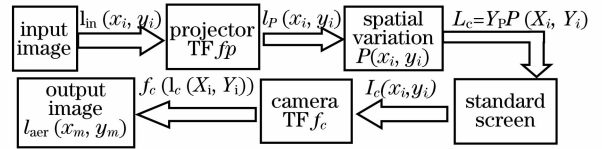


图 2 投影仪照相机系统的数据流

Fig. 2 Data flow of projector-camera system

2.2 亮度均匀性校正原理

为了获得 RGB 颜色的亮度分量,采用标准线性变换计算 YUV 空间的 Y 值来表示^[5]:

$$Y = 0.299r + 0.587g + 0.114b. \quad (1)$$

亮度校正过程中,该空间中另外两个分量 U, V (分别代表色调和饱和度)保持不变,因而观察者感受到的只有亮度的变化,不会感觉到明显的颜色差异。投影仪投出一幅亮度分布为 $Y_{in}(x_i, y_i)$ 的均匀灰度图像,经相机采集、输出并计算得到其亮度分布 $Y_{out}(x_m, y_m)$ 。一般,相机的亮度通道响应函数满足单调可逆性且与色度通道不相关,故根据相机的响应函数 f_c 由 $Y_{out}(x_m, y_m)$ 通过逆运算即可获得经屏幕反射的图像显示亮度均匀性分布,即

$$L_c(x_i, y_i) = f_c^{-1}[Y_{out}(x_m, y_m)]. \quad (2)$$

然后,设 $L_c(x_i, y_i)$ 的亮度平均值 L_0 为校正目标值,则得到显示图像亮度均匀性分布为 $P(x_i, y_i) = \frac{L_0}{Y_{in}(x_i, y_i)}$;同时,考虑投影仪响应函数 f_p ,校正的输入图像 $J(x_i, y_i)$ 应满足

$$L_0 = f_p[J(x_i, y_i)]P(x_i, y_i), \quad (3)$$

而对于原始输入图像 $Y_{in}(x_i, y_i)$, $L_c(x_i, y_i)$ 又可表示为

$$L_c(x_i, y_i) = f_p[Y_{in}(x_i, y_i)]P(x_i, y_i), \quad (4)$$

联立式(3)和(4),得到预校正图像:

$$J(x_i, y_i) = f_p^{-1}\{f_p[Y_{in}(x_i, y_i)]P(x_i, y_i)\}. \quad (5)$$

设校正图像动态范围为 $[l_{min}, l_{max}]$,如图像未饱和则式(5)即为校正结果;对于饱和的情况 ($l_{max} > 255$),剪切法是把灰度值大于 255 的点直接设为 255,而本文的方法首先进行(6)式所示的线性变换:

$$Y_{\text{line}} = (Y_{\text{in}} - d) \cdot \frac{255 - d}{l_{\text{max}} - d} + d, \quad (6)$$

式中 Y_{line} 和 Y_{out} 分别表示线性变换前后某点的灰度值, 参数 d 是图像平均亮度和像面均匀性的权衡参数, 取值范围为 $[0, l_{\text{min}}]$ 。为了进一步提高图像校正质量, 再作非线性变换, 即

$$Y_{\text{out}} = \begin{cases} m \left(\frac{Y_{\text{line}}}{m} \right)^2 & 0 \leq Y_{\text{line}} \leq m \\ 255 - (255 - m) \cdot \left(\frac{255 - Y_{\text{line}}}{255 - m} \right)^2 & m \leq Y_{\text{line}} \leq 255 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $m = 255L_0/l_{\text{max}}$ 。由此, 获得最终的校正图像。该变换的基本思想是对灰度值很大和很小的像素点采用很大的压缩率。这些点通常只占图像很小部分或者处于像面边缘, 对整体图像影响不大, 同时尽可能多地提高中等灰度像素点的灰度值。式(7)是一个通用形式, 如果把式中参数 m 设为定值 128, 则式(7)退化成本标准 S 型曲线。

为了对投影显示亮度均匀性校正结果进行定量

表 1 不同设备 9 个采样点的测量结果 (cd/m^2)

Table 1 Result of 9 sample points for different equipments (cd/m^2)

Position of sample point	Upper left	Upper center	Upper right	Left center	Center	Right center	Lower left	Lower center	Lower right
Photometer	41.84	57.98	54.51	52.16	77.23	70.18	44.61	71.86	65.29
Camera	43.26	59.21	57.25	55.24	77.38	71.69	47.91	72.79	65.45

为了进一步标定投影仪的响应特性, 输入一组灰度级为 $0 \sim 255$ 的均匀灰度图 (间隔为 16) 并分别投影到屏幕上, 利用已知的相机响应函数把相机输出图像中心的一组亮度值 Y_{out} 转换为输入亮度 L , 然后将这组值与原始输入图像亮度值进行多项式拟合即得到投影仪的响应函数 f_p , 如图 3 所示。

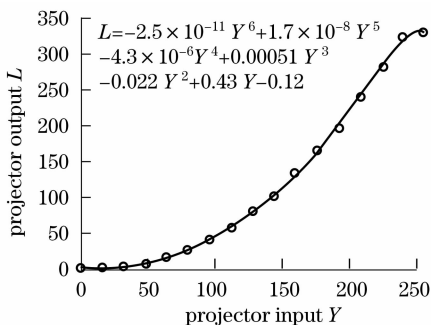


图 3 投影仪响应函数

Fig. 3 Response functions of the projector

评价, 以相机为观察者, 其输出图像采用相对均方根误差 (RRMS) 并以百分数表示为

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{0 < i < M} \sum_{0 < j < N} (L_{ij} - L_0)^2}{MN}} / L_0, \quad (8)$$

式中 $M \times N$ 为显示图像的尺寸 (像素数), L_0 为亮度期望值, L_{ij} 表示像面空间某点的亮度值。定量比较时, 该值越小则表示其均匀性越好。

2.3 系统标定

一般来说, 相机和投影仪的光谱不可能完全一致, 如果预先对系统设备进行标定, 获得相机和投影仪的响应函数, 就能把这种不一致带来的影响降低到最小。本文的目标是亮度校正, 因而标定时只处理亮度通道。

首先利用多项式模型^[9]获得相机的传输响应函数 f_c , 然后分别采用光谱辐射计 PR-650 和相机对 128 灰级投影图取 9 个点测量, 结果列于表 1。可见, 相机测量计算值与光谱辐射计光度测量结果基本一致。因此在后继实验中, 以该相机作为测量设备用于像面亮度均匀性评价。

3 实验结果与讨论

3.1 亮度分布

为了分析不同灰阶图像对投影亮度均匀性的影响, 投影 16 幅不同灰阶的灰度图, 用式(8)评价其相应的相对均方根误差 (RRMS), 实验数据分布及其线性拟合结果如图 4 所示。可见, 灰度值 60 为该系统的临界值, 灰度大于 60 的图像亮度分布稳定性很好; 当灰度降到 60 以下时, RRMS 急剧升高, 这主要是低亮度图像信噪比很低而使亮度分布信息淹没在噪声中所致。总体而言, 灰阶越大亮度分布稳定性越好, 因此本研究中把整体亮度分布定义为

$$L_c(x_i, y_i) = \frac{\sum_{j=1}^k L_j L_{c_j}(x_i, y_i)}{\sum_{j=1}^k L_j}, \quad (9)$$

式中 k 为总的投影图像数, $L_{c_j}(x_i, y_i)$ 是由式(2)计算得到的第 j 幅投影图像的亮度分布, L_j 表示 $L_{c_j}(x_i, y_i)$ 的亮度均值。综合了平均亮度作为权重的

像面亮度分布如图 5(a)所示。可知未校正图像的整体亮度分布很不均匀,中心亮度很高,边缘尤其是四个角上的亮度下降非常明显,从中心到边缘亮度下降了近 50%。通过对像面亮度分布的定量评价可知,其相对均方根误差 RRMS 为 17.7%。

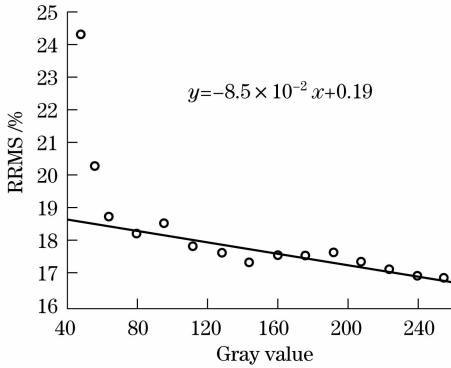


图 4 不同灰级图像的 RRMS 评价

Fig. 4 RRMS estimation of different gray images

3.2 亮度不均匀性校正

按式(5)处理前面得到的未校正像面亮度分布获得校正图像。如果图像未饱和(如灰度为 128 时)

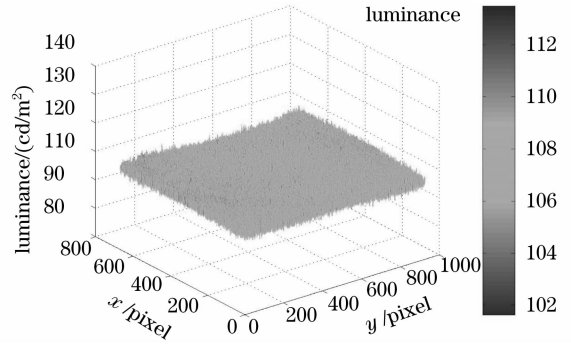
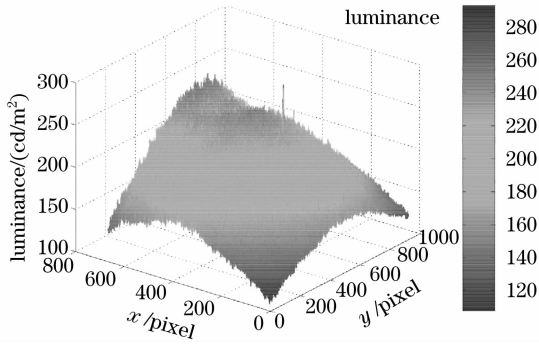


图 5 未校正(a)与校正后(b)像面的亮度分布

Fig. 5 Luminance distribution before correction (a) and after correction (b)

表 2 不同灰级投影图像校正前后之比较

Table 2 Comparison before and after correction for different gray scale images

Gray scale		64	128	160	192	240	255	
Before correction	RRMS	18.8%	17.7%	17.6%	17.8%	17.3%	17.3%	
	AveY	34.2	86.6	113.2	139.6	178.9	181.2	
After Correction	Clipping	RRMS	1.97%	1.55%	1.49%	4.34%	7.22%	8.09%
		AveY	33.4	86.4	111.9	133.7	164.3	167.5
	Nonlinear	RRMS	1.97%	1.55%	1.49%	1.61%	1.69%	1.70%
		AveY	33.4	86.4	111.8	121.2	139.6	142.5

3.3 图像亮度与均匀性的平衡

式(6)中的参数 $d \in [0, l_{\min}]$ 是关于图像平均亮度和均匀性的权衡参数,实质是限制线性变换最小值的参数,即线性偏移量大小,因而 d 增大时图像平均亮度随之提高。并以 240 灰度图为例,表 3 列出了 d 不同取值情况下校正图像亮度及均匀性的

则直接投影,其校正后屏幕显示的空间亮度分布如图 5(b)所示,亮度分布基本为平面,均匀性大大提高,像面的 RRMS 降至 1.55%。

对于校正图像饱和的情况,表 2 分别给出了剪切法(Clipping)和非线性(Nonlinear)方法的校正结果。可见,当校正图像无饱和(如灰级为 64 和 128)或饱和区域很小(如灰级为 160)时,两种方法的处理结果一致。随着饱和区域逐渐增大(如灰级从 192 增大至 255 时),剪切法的均匀性误差明显增大,且剪切法校正的图像在饱和区域边界有跳变,故其实际视觉效果会更差;而非线性方法克服了上述问题,以灰级 240 为例,校正前后投影图像亮度不均匀程度 RRMS 从 17.3% 降到了 1.69%,获得了与图像未饱和时相同精度的校正效果。另一方面,表 2 是以像面均匀性最优为目标而得到的校正结果,所以对于饱和图像,非线性方法只保留了部分图像亮度,若希望进一步提高亮度,则可通过适当调整公式(6)中参数 d 来实现。

变化。可见,当 $d=0$ 时其像面不均匀性较严重,此时线性变换的常数项为 0,因而不均匀性主要是由式(7)的非线性造成的;当 d 增大时,不均匀性反而下降,原因是与 d 有关的线性偏移量的增加补偿了部分非线性的影响,而平均亮度亦有所提高;若 d 继续增加,虽可进一步提高平均亮度,但像面均匀性

却随之下降。因此,在本研究条件下,当 $d/l_{\min} = 2/6$ 时其校正图像的 RRMS 最小为 1.69%,此时平均亮度为 139.6。在实际应用中,可根据具体要求(如

均匀性或平均亮度大小的限制)通过迭代求取 d 参数的最优值,以达到所需的图像均匀性和总体亮度校正目标。

表 3 参数 d 对 240 灰度图非线性校正效果的影响

Table 3 Influence of d parameter on 240 gray image by nonlinear correction

d/l_{\min}		0	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	1
Nonlinear	RRMS/%	3.80	2.14	1.69	2.39	3.72	4.95	6.08
correction	AveY	127.4	133.1	139.6	144.5	149.6	154.9	159.5

4 结 论

本文基于投影仪相机系统,针对投影图像亮度均匀性的稳健校正方法进行了研究。首先借助光谱辐射计验证了相机测量的可靠性,提出亮度分布评价公式和适用于不同灰级图像的校正方法;然后针对图像饱和情况提出一种非线性处理方法,并针对图像亮度和均匀性的平衡进行了讨论。实验结果表明,采用非线性方法处理饱和图像后,其校正像面的均匀性达到了处理未饱和图像时的校正精度,同时基本保持了图像的整体亮度,并且对不同灰级的图像都获得了满意的校正效果。

参 考 文 献

- Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913~918
- 赵 星,方志良,崔继承 等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 913~918
- Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587~591

- 周 平,陆 巍,林宇翔 等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 587~591
- K. Fujii, M. D. Grossberg, S. K. Nayar. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2005, **1**: 814~821
- A. Majumder, R. Stevens. Color non-uniformity for projection based displays: analysis and solutions[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2004, **10**(2): 177~188
- A. Majumder, R. Stevens. LAM: luminance attenuation map for photometric uniformity in projection based displays[J]. *Virtual Reality Software and Technology*, 2002, 147~154
- Jhunjhunwala R K. Camera Projector Systems [R]. *M. Tech Project 1st Stage Report*, 2005, 17
- S. K. Nayar, Harish Peri, M. D. Grossberg. A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections[C]. *In Proceedings: ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS-2003)*, October 2003
- Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
- 潘 伟,赵 毅,阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691
- G Hong, MR Luo, PA Rhodes. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. *Color Research & Application*, 2001, **26**(1): 76~84