

文章编号: 1003-501X(2006)06-0101-05

彩色数码相机光强响应特性的标定实验

吴波¹, 符泰然^{1,2}, 程晓舫¹, 袁耀明¹, 郑小兵³, 章骏平³

(1. 中国科学技术大学 热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029;

3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 遥感部, 安徽 合肥 230031)

摘要: 当前高动态彩色数码相机的光强响应具有强烈的非线性, 针对于此, 用多项式这种非线性模型对彩色数码相机红、绿、蓝三通道的光强响应特性予以描述。建立了一种利用曝光时间测量 CCD 彩色数码相机光强响应特性的方法, 通过调整快门速度获得不同的光强。同时, 设计了标定实验, 选用 OLYMPUS E20 数码相机对上述理论分析成果进行了实验验证, 分别采用多项式模型和 γ 幂模型对实验数据进行拟合。实验结果表明, 光强响应标定方法是可行的, 多项式模型更适于描述彩色数码相机光强响应特性。

关键词: CCD; 光强响应; 数码相机; 标定**中图分类号:** TB852**文献标识码:** A

Calibration experiment for intensity response characteristics of digital color camera

WU Bo¹, FU Tai-ran^{1,2}, CHENG Xiao-fang¹, YUAN Yao-ming¹,
ZHENG Xiao-bing³, ZHANG Jun-ping³(1. *Department of Thermal Science and Energy Engineering,**University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*2. *China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China;*3. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,**the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)*

Abstract: For digital color camera with high dynamic range, the intensity response characteristic is strongly nonlinear. Therefore, this paper established the non-linear model (polynomial) to respectively predict the intensity response characteristics for three channels (R, G, B) of digital color camera. Then a convenient method was put forward to determine the intensity response curves of digital color camera by only adjusting the exposure duration. For the specified digital color camera, Olympus-E20, we set up the calibration experiments of intensity response characteristics and presented the corresponding experimental results through polynomial model fitting and γ exponent model fitting. The results show that the calibration method mentioned in this paper is feasible. And the polynomial model is more suitable to describe the response characteristics of digital color camera.

Key words: CCD; Intensity response; Digital camera; Calibration

收稿日期: 2005-05-19; 收到修改稿日期: 2005-09-13

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(97035821)

作者简介: 吴波(1981-), 男(汉族), 安徽宿松人, 硕士生, 主要从事应用光学和现代光学测量的研究。E-mail: wubo81@mail.ustc.edu.cn

引言

数码相机自问世以来,随着技术的日臻完善,逐渐被应用于摄影、医疗、遥感及许多其它的科学研究领域。CCD(Charge Coupled Device)是数码相机中常用的光电转换部件,是大多数新型数码相机成像系统的重要组成部分之一。为了满足日益广泛的应用需要,目前已有许多文献资料从不同的角度对 CCD 的成像特性进行了深入的研究,如 CCD 像素颜色插值算法^[1]、CCD 图像去噪的研究^[2]、提高 CCD 成像分辨力系统的算法^[3]等。

其中,CCD 数码相机光强响应特性也是研究的重点之一。通常对于具有低动态响应范围的 CCD 数码相机,由于 CCD 器件在它的工作范围内的线性光电响应特性^[4],由此整个 CCD 数码相机系统也具有线性光强响应特性。数码相机的很多数据处理过程都基于此,如颜色矫正、图像修复、色度分析等。然而,目前新型的具有高动态响应的 CCD 数码相机,由于受输出的数字信号的动态范围限制,相机内部的校正电路必然对光强信号进行非线性压缩,这样即导致 CCD 数码相机具有强烈的非线性光强响应特性。

1 光强响应的非线性模型

数码相机是集光学、机械、电子于一体的产品,它集成了影像信息的转换、存储和传输等部件,具有数字化存取模式、与电脑交互处理、实时拍摄等特点。图 1 是 CCD 数码相机基本工作原理示意图。

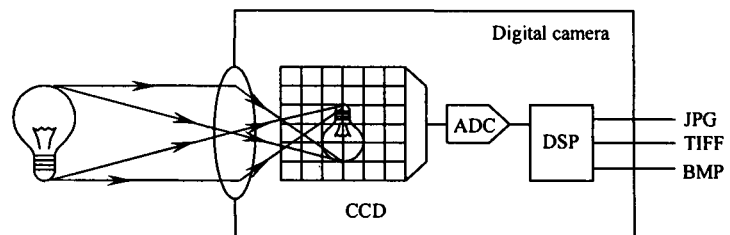


图 1 数码相机基本工作原理示意

Fig.1 Sketch for the basic operating principle of digital camera

数码相机的光学系统将物体的影像聚焦成像在感光元件 CCD 上,CCD 阵列中每一个像素点就是一个光传感器,通过光电转换,产生模拟电信号;模拟电信号通过模数转换器(ADC)被转换为数字信号,再经过数字信号处理器(DSP)进行处理,最终物体的影像信息以 JPG、TIFF、TGA、BMP 等数字图像格式存储输出。

通常面阵 CCD 彩色数码相机的存储精度多为 24 位(红、绿、蓝每通道各 8 位,数值范围为 0~255),即 24 位的色彩深度。通过图像分析软件,可以获得数字图像上的任一像素点的色彩信息(红、绿、蓝三通道信息)。

令 R, G, B 分别代表物体数字存储图像中任一像素的红、绿、蓝三通道的数值,建立如下光强响应模型:

$$\begin{cases} R = \Psi_1(P) + n_1 \\ G = \Psi_2(P) + n_2 \\ B = \Psi_3(P) + n_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Psi_i(i=1, 2, 3)$ 分别是三通道的非线性响应函数; $n_i(i=1, 2, 3)$ 为三通道的噪声信号,包括暗电流噪声、量化噪声等;该像素点所获得的光照强度 P 为

$$P = (t / F^2) \beta L \quad (2)$$

式中 β 表示成像的空间几何因子; t 表示相机的曝光时间; F 为相机光圈的大小; L 为物体的表面亮度。

函数 Ψ_i 描述了面阵 CCD 数码相机的光强响应特性,通常采用线性模型和 γ 幂指数模型予以描述:

$$\Psi(P) = aP \quad (3)$$

$$\Psi(P) = \alpha P^\gamma \quad (4)$$

式(3)和(4)是针对早期型号的 CCD 数码器件的数学物理传输过程提出的。然而如引言所述,当前的高动态数码相机的光强响应具有强烈的非线性特性。因此,对于 CCD 彩色数码相机的光强响应特性研究,本文采用数学上常用的 N 阶多项式作为光强响应特性预测的函数:

$$\Psi_i(P) = \sum_{m=1}^{N_i} c_{i,m} P^m, \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

这里,多项式的阶数 N_i 和系数 $c_{i,m}$ 即代表了光强响应函数 Ψ_i 的全部数学特征。一般来说,不同型号的CCD彩色数码相机具有不同的阶数 N_i 和系数 $c_{i,m}$,因此为了数码相机的应用研究需要,需确定出这些参数。

2 光强响应标定实验的理论分析与设计

2.1 噪声信号

由(1)式可知,当 $P=0$ 时,即盖上数码相机的镜头盖,在没有入射光的情况下,有:

$$\Psi_i(0) = 0 \quad (6)$$

红、绿、蓝三通道的输出信号为 (R_0, G_0, B_0) :

$$R_0 = n_1, G_0 = n_2, B_0 = n_3 \quad (7)$$

通过(7)式即可以确定噪声信号 n_i 。

2.2 标定实验原理

根据式(1), (5)和(7),有

$$\sum_{m=1}^{N_1} c_{1,m} P^m = R - R_0, \sum_{m=1}^{N_2} c_{2,m} P^m = G - G_0, \sum_{m=1}^{N_3} c_{3,m} P^m = B - B_0 \quad (8)$$

求得多项式的阶数 N_i 和系数 $c_{i,m}$ 是我们分析讨论的主要目的。

对于红通道,我们在 n 个不同光照强度下 (P_1, P_2, \dots, P_n) ,可以得到如下测量方程:

$$\begin{cases} c_{1,1}P_1^1 + c_{1,2}P_1^2 + \dots + c_{1,N_1}P_1^{N_1} = R_1 - R_0 \\ c_{1,1}P_2^1 + c_{1,2}P_2^2 + \dots + c_{1,N_1}P_2^{N_1} = R_2 - R_0 \\ \vdots \\ c_{1,1}P_n^1 + c_{1,2}P_n^2 + \dots + c_{1,N_1}P_n^{N_1} = R_n - R_0 \end{cases} \quad (9)$$

只要 $n > N_1$,由(9)式可以求解出阶数 N_i 和系数 $c_{i,m}$;同理,也适用于绿通道和蓝通道。为了对三路信号进行同时标定,要求 $n > \max N_i, i=1, 2, 3$ 。

在传统标定测量中,通常采用一个亮度稳定的主动光源,投射在具有不同反射率的测试卡上,从而形成不同强度的反射光进行CCD的光强响应的标定。而我们依据(2)式,在物体表面亮度 L 不变的情形下,调整数码相机的曝光时间即可以实现光照强度的有序调整,即

$$P_j = (t_j / F^2) \beta L, j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式(9)和(10)构成了光强响应特性研究的实验理论基础,这是一种便捷的标定方法。

2.3 标定实验设计

2.3.1 数码相机的设置

以OLYMPUS-E20面阵CCD彩色数码相机作为待标定相机。该款相机快门速度(曝光时间)1/640~60s;光圈F2.4-11;曝光补偿单位 $\pm 1/3$ EV;感光器件为17mm(即2/3英寸),524万像素CCD;CCD的动态响应范围到达30位(红、绿、蓝通道各10位),然而输出存储图像仅为24位(每个通道各8位),显然该款相机内部必然存在光强响应的非线性压缩,即每通道均由10位的动态精度压缩到8位。

数码相机的电子快门具有非常高的精确性,每档相差 $2^{1/3}$,它的调整能精确地控制曝光时间的大小,实验中设定的调整范围为1/640~1/2s。数码相机的其它常用参数设置如表1。

表1 相机参数设置

Table 1 Parameter setup for digital color camera

| Aperture | Flash | White balance | Exposure metering | Focus mode | ISO | Exposure compensation | Storage format | Color correction |
|----------|-------|---------------|-----------------------------------|------------|-----|-----------------------|----------------|------------------|
| F5.6 | OFF | 6500K | Centerweighted averaging metering | Auto focus | 100 | 0EV | TIFF | Default mode |

2.3.2 光源的选取

我们采用积分球的光源作为标定实验中亮度稳定的成像物体。积分球是一种理想的匀光器,可以提供

均匀亮度的物面。它是一个中空的完整球壳，内壁涂有漫反射层，一般为氧化镁或硫酸钡材料。球壁上开有一个窗孔，即出光孔，在球内壁上与出光孔对称地均匀设置有几组灯泡（本实验所用积分球有 12 组灯泡），灯泡发出的光经积分球内壁多次漫反射后，由出光孔均匀射出。每组灯泡都有一个稳流控制器，从而保证发射光的稳定性，进而保证出射光的稳定。

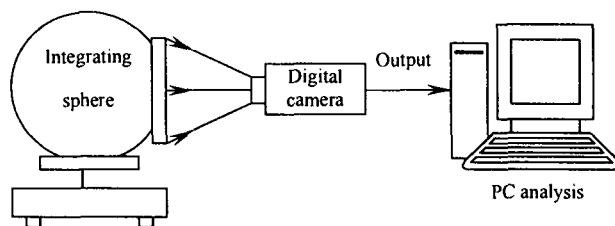


图 2 数码相机标定实验

Fig.2 Calibrating experiment for digital color camera

2.3.3 实验设计流程

1) 调整好积分球的亮度； 2) 按照 2.3.1 的要求设置数码相机参数； 3) 调整相机与积分球间角度与距离，使之能够清晰成像，同时尽量使积分球的出射光充满数码相机的整个视场； 4) 标定实验在暗室中进行，避免不必要的杂散光对相机成像的干扰； 5) 选择不同的快门速度（表 2 所列），数码相机拍摄、记录、存储为 TIFF 格式的数字图像，传输至 PC 机进行分析处理。图 2 为标定实验的示意图。

3 实验结果分析

依据 Bayer 模型^[5]从记录图像中心一个小的区域内采样相邻的 4 个像素，读取三通道 R, G, B 数值，对每个通道分别取这 4 个像素平均值作为该曝光时间下的有效 R, G, B 值。表 2 列出了不同曝光时间下的三通道信号数值。其中，1) 由于商业数码相机的内部电路对噪音已有处理，所以测量的噪音输出信号 $R_0=0, G_0=0, B_0=0$ ； 2) 曝光时间每档之间具有精确的比例关系 $2^{1/3}$ ，但为了方便标示，很多曝光时间的数字采用近似的整数，例如，相比于 1/640s 这一档，1/500s 这一档的实际曝光时间应为 1/507.97s，所以在计算相对光照强度时，以最大曝光时间 t_{max} 为基准，采用精确的比例关系 $2^{1/3}$ 作类推计算。

表 2 三通道数值与曝光时间的对应表

Table 2 Corresponding relationship between exposure duration and response value for three channels

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| t | 1/640 | 1/500 | 1/400 | 1/320 | 1/250 | 1/200 | 1/160 | 1/125 | 1/100 | 1/80 | 1/60 | 1/50 |
| R | 20.875 | 29.063 | 35.813 | 39.750 | 51.250 | 60.375 | 70.063 | 84.250 | 101.188 | 113.875 | 131.000 | 150.500 |
| G | 9.500 | 11.063 | 14.938 | 19.875 | 21.250 | 28.688 | 34.000 | 39.375 | 50.625 | 60.625 | 73.688 | 87.125 |
| B | 1.813 | 4.250 | 3.938 | 2.438 | 6.375 | 8.313 | 9.250 | 12.375 | 14.625 | 17.625 | 22.563 | 28.688 |
| t | 1/40 | 1/30 | 1/25 | 1/20 | 1/15 | 1/13 | 1/10 | 1/8 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 |
| R | 169.563 | 188.500 | 202.313 | 213.813 | 224.875 | 236.313 | 243.500 | 246.563 | 249.250 | 252.000 | 251.188 | 253.000 |
| G | 104.500 | 118.750 | 137.000 | 155.750 | 176.500 | 193.500 | 209.625 | 225.313 | 240.125 | 252.250 | 252.813 | 253.938 |
| B | 33.313 | 43.188 | 58.438 | 71.125 | 93.250 | 114.375 | 130.313 | 146.688 | 164.500 | 177.750 | 202.688 | 222.625 |

考虑到数码相机信号的非失真性，一般界定其有效输出信号范围在 10~240 之间。由(10)式知，绝对光照强度与曝光时间 t_j 成正比，定义相对光照强度 p_j 为

$$p_j = P_j / [(t_{max} / F^2) \beta L] = t_j / t_{max}, j = 1, 2, \dots, n \tag{11}$$

由于数码相机传输系统的复杂性及空间测量因子的影响，它不具备绝对信号测量的能力，其所获得的输出信号本身仅具有相对意义，但这足以满足它在相关领域的应用，所以这里我们采用相对光照强度来分

表 3 多项式与 γ 幂指数拟合参数评估

Table 3 The fitting parameter value and evaluation for polynomial and γ exponential fitting

| Channel | Fitting function | Correlation coefficient |
|---------|--|-------------------------|
| R | $R = 4154.77562p - 35229.64782p^2 + 146188.49536p^3 - 226685.14071p^4$ | 0.99806 |
| | $R = 514.71851 \times p^{0.48399}$ | 0.96262 |
| G | $G = 1813.14707p - 7627.51022p^2 + 18068.91027p^3 - 17040.38522p^4$ | 0.99962 |
| | $G = 421.21384 \times p^{0.58379}$ | 0.98055 |
| B | $B = 511.04115p - 277.1529p^2 - 291.02599p^3 + 280.97228p^4$ | 0.99722 |
| | $B = 239.95995 \times p^{0.64916}$ | 0.97271 |

析光强响应特性, 横坐标为相对光照强度 p , 纵坐标为三通道 R, G, B 数值。采用 N 阶多项式((5)式)和 γ 幂指数模型((4)式)分别对三通道信号进行拟合, 相应的拟合参数见表 3, 拟合结果见图 3~8。

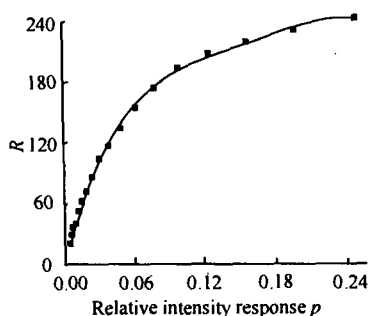


图3 红通道的多项式拟合

Fig.3 Polynomial fitting for red channel

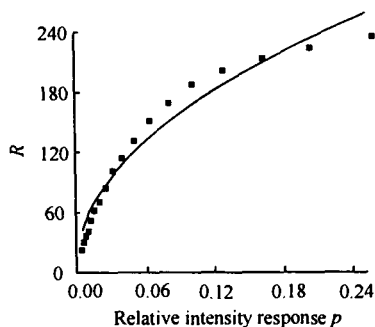
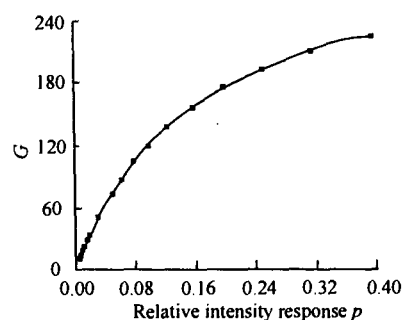
图4 红通道的 γ 幂指数拟合Fig.4 γ exponential fitting for red channel

图5 绿通道的多项式拟合

Fig.5 Polynomial fitting for green channel

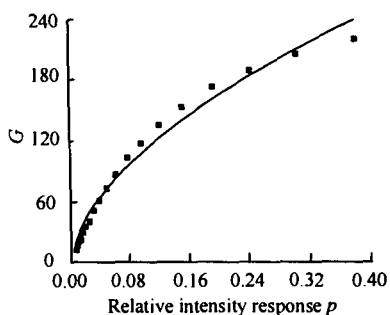
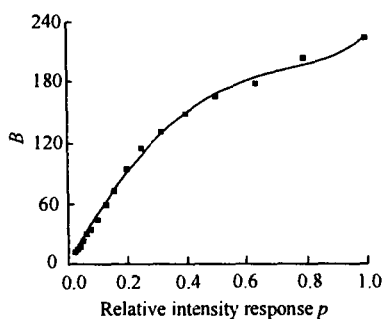
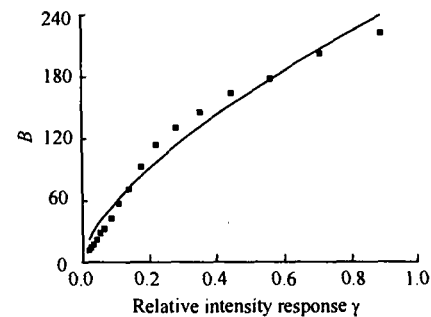
图6 绿通道的 γ 幂指数拟合Fig.6 γ exponential fitting for green channel

图7 蓝通道的多项式拟合

Fig.7 Polynomial fitting for blue channel

图8 蓝通道的 γ 幂指数拟合Fig.8 γ exponential fitting for blue channel

4 结论

本文提供了一种研究彩色数码相机光强响应曲线的方法, 即通过改变相机的曝光时间来获得不同的光照强度实现标定测量; 同时建立了不同于传统的光强响应曲线模型, 用多项式这种非线性模型作为光强响应特性预测的函数; 并完成了对 OLYMPUS-E20 数码相机光强响应曲线的标定工作。实验结果表明, 多项式光强响应模型优于 γ 次幂指数模型, 更适于描述高动态彩色数码相机的光强响应曲线。完成了光强响应曲线的标定工作, 为今后数码相机的进一步研究应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李奇, 徐之海, 冯华君. 面向数字相机的 CCD 像素颜色插值新算法研究[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 68-71.
LI Qi, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun. Study on New Interpolation Algorithm for Pixel Color of CCD in Digital Camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(3): 68-71.
- [2] 项震. 基于 CCD 器件特征的图像噪声消除[J]. 光电工程, 2001, 28(6): 66-68.
XIANG Zhen. Elimination of Image Noise with CCD Device Characteristics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(6): 66-68.
- [3] 王凌, 张平, 冯华君, 等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 62-65.
WANG Ling, ZHANG Ping, FENG Hua-jun, et al. An Inversion Analysis Method Based on Multi-Shift Imaging for Improvement of CCD Imaging Resolution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(3): 62-65.
- [4] MOREELS E, de GREEF C, FINSY R. Laser light refractometer [J]. *Appl. Opt*, 1984, 23(17): 3010-3013.
- [5] 王庆有. CCD 应用技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
WANG Qing-you. *CCD Technique* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.