

基于多幅不同曝光量照片的场景高动态范围图像合成

华 顺 刚* , 王 丽 丹, 欧 宗 璞

(大连理工大学 机械工程学院 CAD&CG研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 提出了一种恢复相机成像系统光照响应曲线,合成场景高动态范围图像的方法. 在满足光学成像系统相反法则的前提下,利用多幅同一场景不同曝光量的照片图像,结合最小二乘原理和B样条函数拟合法,恢复了相机的光照响应曲线,获得图像中像素值与曝光量之间的映射关系,进而将不同曝光量的场景照片图像融合成一幅高动态范围图像. 图像中的像素值与场景中对应点的真实亮度值成正比,扩大了场景图像的范围,增加了场景图像中高亮区和暗区的细节特征. 实验表明,合成的高动态范围图像效果满意.

关键词: 高动态范围图像; 响应曲线; 亮度; 照度; 曝光量
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

0 引 言

在传统的数字图像格式(如 BMP格式)中,每种颜色的深度是用 8-bit来存储的,只能表示 256个深度等级,图像的色差范围十分有限. 而且,这类图像中像素值与场景中对应点的亮度值不是成正比的关系. 例如在室内拍摄有阳光射入的门、窗等场景图像,或者对着有太阳、灯光的方向拍摄的图像等就存在这样的问题. 这与拍摄参数、成像特性、扫描及数字化处理过程、保存格式等诸多因素有关.

高动态范围图像 (high dynamic range image, HDRI)^[1-3]是一种可以表示实际场景中亮度大范围变化的图像类型,图像中的像素值正比于场景中对应点的实际亮度值,因此,可以更好地表示场景中亮区和暗区的光学特性. 高动态范围图像所要表示的像素值范围通常很大,有时需要达到数十万,甚至数百万,因此,高动态范围图像一般是将像素值转化为单精度浮点型小数或对数保存.

高动态范围图像的应用领域非常广泛. 例如:基于图像的光照技术^[4-6]和增强现实^[1]中用

高动态范围图像来照明真实的或计算机生成的对象可以获得逼真的效果;基于图像的建模和绘制^[2,8]及图像合成中使用高动态范围图像可以避免因拍摄方向和曝光量不同致使图像间存在亮度和色调的差异等因素而影响建模、绘制效果;另外,高动态范围图像还可广泛用于电影特技、人类视觉系统的模拟、卫星遥感图像、运动模糊等诸多领域.

本文针对普通相机,提出一种利用同一场景的不同曝光时间下拍摄的多幅照片图像,结合最小二乘原理和B样条函数拟合法,生成较光滑的光照响应曲线,进而合成高动态范围图像的方法,以更清楚地显示亮区和暗区的细节.

1 高动态范围图像的存储格式

普通位图的动态范围很有限,像素值与场景中对应点的亮度值不成比例,对深度超出 255的部分只能用 255表示,而在 0附近的区域精度会降低,场景中亮度已达饱和区域和黑暗区域的细节会丢失,通常很难满足某些特定的场景光照要求. 但如果用 HDRI图像来存储,就可以解决上

收稿日期: 2006-01-19; 修回日期: 2007-08-02.
基金项目: 大连市科技基金资助项目 (2004166); 大连理工大学交叉学科 (光电子+ X)建设资助项目 (2005).
作者简介: 华顺刚* (1964-), 男, 副教授; 欧宗璞 (1936-), 男, 教授, 博士生导师.
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

述问题. 因为 HDRI 图像一般采用浮点数存储数据, 可以大范围、高精度地表示出真实场景的光照信息. 几种较常用的 HDRI 存储格式有 Radiance 的 RGBE 格式、Pixar 的 log-encoded TIFF 格式、SGI Log Luv TIFF 格式、ILM 的 OpenEXR 格式等. 这些存储格式各有特色, 本文采用 Radiance 的 RGBE 格式存储高动态范围图像.

RGBE 格式^[9]实际上是用整数值来保存浮点型小数, 每个像素用 32-bit 保存. 像素值被分为两部分——尾数和指数, 其中尾数部分用 3 个 8-bit 分别存储 R、G、B 颜色分量, 另 1 个 8-bit 存储公用的以 2 为底的指数. 该格式的优点是既保证了小数的精度, 又节省了空间. 将小数像素值转化成整数时, 先将原始的 R、G、B 值标准化成尾数和以 2 为底的指数相乘的形式, 并保证尾数的最大值在 0.5~1.0; 再将每个尾数线性映射成 0~255 的整数. RGBE 格式可以保存的动态范围可达到 76 个数量级 ($2^{27}/2^{128} \approx 6 \times 10^6$), 绝对精度达到 1%. 这种格式可以利用行程编码对图像进行无损压缩, 平均压缩率约为 20%.

2 恢复成像系统的光照响应曲线

成像系统的光照响应曲线是相机曝光量与图像像素值之间关系曲线, 是合成高动态范围图像的关键. 本文利用几幅针对同一场景不同曝光时间的照片图像拟合出光照响应曲线.

2.1 相机成像原理

传统胶片成像过程是基于光化学理论, 数码成像过程则是基于光电子学理论. 传统的胶片相机在拍摄时, 光线通过相机的镜头到达胶片的感光晶体 (卤化银) 上, 引起胶片的光学密度发生变化, 曝光量 H 越大, 光学密度越小, 但并不是成线性关系. 之后, 通过扫描、数字化等非线性处理, 转换成数字图像. 与胶片成像不同, 数码相机是利用感光元件 (一般是 CCD 摄像头) 把接收到的光信号转变为正比于曝光量 H 的模拟电信号, 再经过模拟/数字转换器 A/D 处理后变成数字信号, 最后经过后续的非线性运算转换为图像的数码文件 (如图 1 所示).

一般来说, 相机的曝光量 H 正比于接收到的照度值 E 与快门时间 Δt 的乘积, 即 $H = E\Delta t$, 这是成像的相反法则. 但在极限条件下, 当 Δt 大于 10 s 或小于 1/1 000 s 时, 极限法则将会不成立.

相机接收到的照度值 E 与场景中对对应点的亮度值 I 是成正比的, 即有 $E = qI(d/f)^2$, 其中 q 为相机成像系统的特性系数, d 为镜头的有效孔径, f 为镜头的焦距. 合成高动态范围图像时, 一般并不需要获得亮度的绝对值, 只要能得到相对亮度值即可表征出场景信息. 由于相机接收到的照度值 E 正比于场景亮度值 I , 恢复光照响应曲线, 只需求出图像中像素值 V 与照度值 E 之间的映射关系.

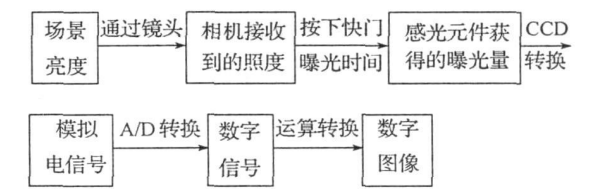


图 1 数码相机的成像原理
Fig. 1 Imaging process of digital camera

2.2 恢复光照响应曲线

对同一场景定点拍摄 M 幅不同曝光量的照片图像 (拍照时, 每幅照片的快门速度不应该相差太大, 以免增大误差). 从这些原图像中随机或手动取出 N 组位置对应的采样点. 如图 2 所示, 共有 $M = 5$ 幅图像, 每幅图像各取 $N = 4$ 个采样点, 图中相同形状的符号表示不同图像中的同一点, 每一组采样点都对应一条特征曲线. 横坐标是曝光量的对数值 $\ln H$, 纵坐标是像素值 V . 因为不知道曝光量的绝对数值, 假设每一组点的照度值 E 均为 1, 则横坐标方向 ($\ln H$) 上的位置随曝光时间 Δt 而定. 但实际上不同点的照度值 E 并不相同, 可以通过左右平移这 $N (= 4)$ 条曲线, 将它们平滑地拼接到一起, 就得到了成像系统的光照响应曲线, 但合成曲线的水平位置仍不能确定, 需要人为定义. 合成的光照响应曲线在亮区和暗区表现出非线性特性.

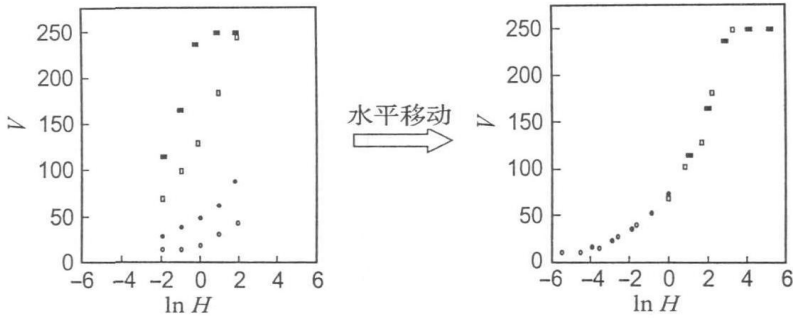


图 2 拟合光照响应曲线过程

Fig. 2 The process of recovering response curve

拟合过程分两步实现: 利用最小二乘原理求解超静定方程, 得到初步的响应曲线, 但由于噪声和误差的存在, 该曲线不很光滑; 在此基础上, 应用 B 样条函数拟合出光滑的光照响应曲线. 假设像素值 V 与曝光量 H 之间有如下函数关系 (大写字母 V 表示离散变量, 小写字母 v 表示与之相应的连续变量):

$$V_{ij} = f(H_{ij}) \tag{1}$$

式中: f 是非线性函数; i 表示像素位置的索引 ($i = 1 \sim N$), j 表示不同图像的索引 ($j = 1 \sim M$); V_{ij} 表示第 j 幅图像中第 i 个位置的像素值; H_{ij} 表示第 j 幅图像中第 i 个位置的曝光量. 一般来说, 图像的曝光量越大, 像素值就越大, 所以可以认为 f 是单调增函数, 对式 (1) 求反函数得

$$H_{ij} = f^{-1}(V_{ij}) \tag{2}$$

因为 $H_{ij} = E_i \Delta t_j$; 其中 Δt_j 表示拍摄第 j 幅图像的快门时间, E_i 为相机在第 i 个位置接收到的照度. 则式 (2) 可表示为

$$f^{-1}(V_{ij}) = E_i \Delta t_j \tag{3}$$

上式两边同时取对数, 得 $\ln f^{-1}(V_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$, 令 $F(v) = \ln f^{-1}(v)$, 则

$$F(V_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \tag{4}$$

其中, V_{ij} 和 Δt_j 是已知的, $F(V_{ij})$ 和 $\ln E_i$ 是未知的, 而且 $F(v)$ 就是需要拟合的非线性函数.

在传统的数字图像中, V 是 $0 \sim 255$ 的整数, 所以并不需要 $F(v)$ 的确切表达式, 只要计算出相应的 256 个 $F(V_{ij})$ 值就可以了. 为此, 对式 (4) 的求解转化成对最小二乘目标函数的求解^[2]:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [F(V_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 = o \tag{5}$$

式中: M 为原图像数; N 为采样像素的组数. 可在上式中引入平滑项 $F''(v) = F(v-1) - 2F(v) + F(v+1)$ 来平滑曲线.

这样, 每一幅原图的每一个采样像素点都对应一个方程, 加上确定曲线位置的方程 $F(128) = 0$, 共 $N \times M + 1$ 个方程构成了一个线性求解系统. 为了保证曲线的形状惟一, 要求这个求解系统必须是超静定的 (至少是静定的). 系统中, 需求解的未知量是 256 个 $F(V)$ 和 N 个 $\ln E_i$, 若 $N \times M + 1 \geq 256 + N$, 即 $N \times (M - 1) \geq 255$, 则可以利用奇异值分解的方法求得这个超静定系统的最小二乘解, 获得响应曲线的雏形.

在拍照过程中, 相机的细小颤动以及噪声等原因, 造成曲线有波动现象. 为了尽量消除波动现象, 本文利用三次 B 样条函数对已经得到的曲线实现进一步拟合, 在 V 方向上每隔 8 个像素值选取一个控制点, 拟合获得较光滑的响应曲线. 针对彩色图像, 本文对 R G B 三种颜色分别进行拟合.

图 3 是同一场景的 6 幅数码照片, 快门时间依次是 $1/8 \text{ s}$ $1/4 \text{ s}$ $1/2 \text{ s}$ 1 s 2 s 和 4 s . 图 4 为根据上述方法恢复的该场景 R G B 三种颜色的光照响应曲线, 分别用实线、虚线、点画线表示. 图中用 $F(128) = 0$ 确定曲线的水平位置, 横坐标表示曝光量 H 的对数值, 纵坐标表示像素值 V .

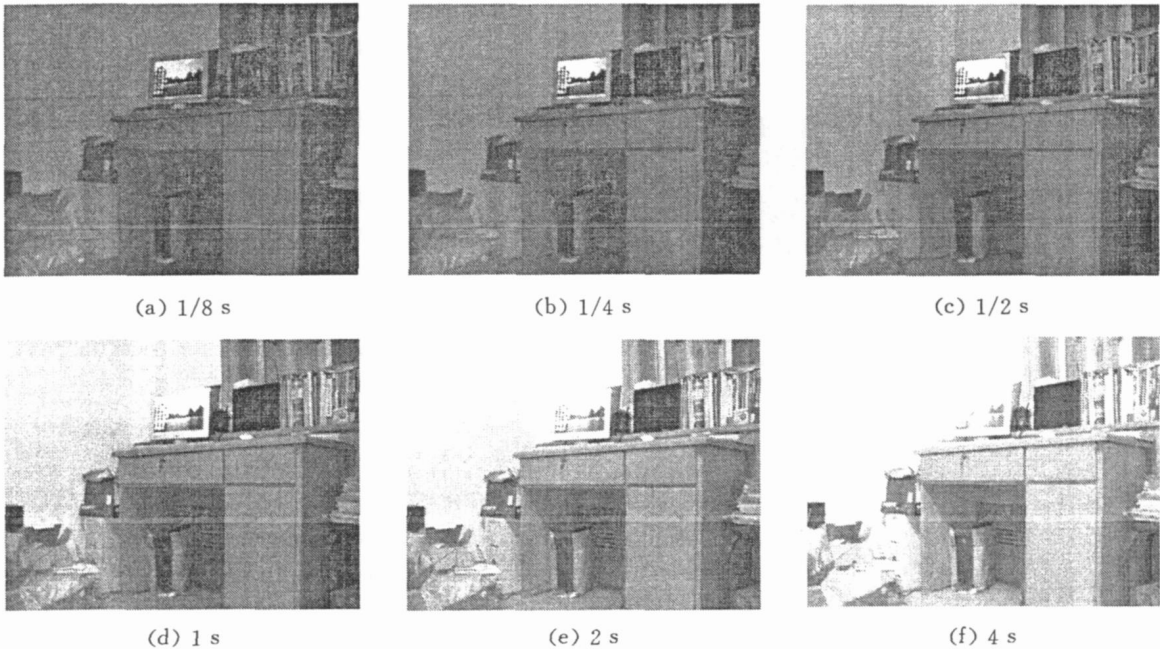


图 3 不同曝光量的数码照片
Fig. 3 Digital photographs with different exposures

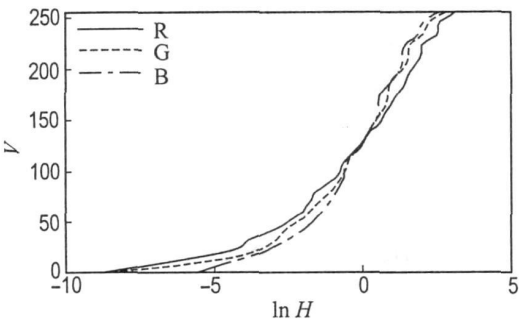


图 4 结合最小二乘法 和 B样条函数拟合的
光照响应曲线

Fig. 4 The recovered response curves by the least squares and B-spline function

3 合成高动态范围图像

拟合出光照响应曲线后,就可以根据该曲线生成场景的高动态范围图像. 由方程 (4) 可得

$$\ln E_i = F(V_{ij}) - \ln \Delta t_j \tag{6}$$

直接利用式 (6) 即可求出实际场景的照度,也可以融合所有的 M 幅原图像计算每个像素的照度值 E_i 来减小误差:

$$\ln E_i = \left[\sum_{j=1}^M [F(V_{ij}) - \ln \Delta t_j] \right] \setminus M \tag{7}$$

利用上式即可求出所有像素点的照度值,其值的变化范围很大,且正比于实际场景点的亮度.

本文拟合出的是场景照度 E 的相对值,换算

之,是亮度 I 的相对值 (因为二者是成正比的). 如果想要得到场景亮度 (或照度) 的绝对值,可以利用某一已知的亮度来标定比例系数,获得绝对亮度 (或照度) 值.

4 实例与结语

图 3 中的 6 幅照片图像是用三星 Digimax U-C A401/Kenox ME4 数码相机定点拍摄的. 图 3(a) 中计算机屏幕上的蓝天可以较好地表现出来,但书桌后的背景较暗,有些细节无法辨认;图 3(c) 和 (d) 中书桌后的背景、计算机屏幕边框较清楚,但计算机屏幕上的蓝天为失真的白色;图 3(f) 中曝光时间最长,致使计算机屏幕和背景墙无法分辨. 在微机上,利用 VC++ 6.0 环境编程,从中随机抽取了 150 组对应点用于拟合光照响应曲线 (见图 4).

图 5 是根据拟合的光照响应曲线,融合 6 幅原始图像后生成的高动态范围图像,从图中可以看出,亮区 A (计算机屏幕)、暗区 B (桌后的背景) 和暗区 C 的细节均较清楚. 图中标注的最暗点 ① 的相对亮度值为 (0.017 1, 0.017 1, 0.023 4),最亮点 ② 的相对亮度值为 (85.847 8, 92.233 8, 123.299 9),动态范围高达 7.2×10^3 .

可以看出,本文研究的恢复成像系统光照响应曲线,合成高动态范围图像的方法合理可行,由

多幅不同曝光量的图像合成的高动态范围图像效果良好.

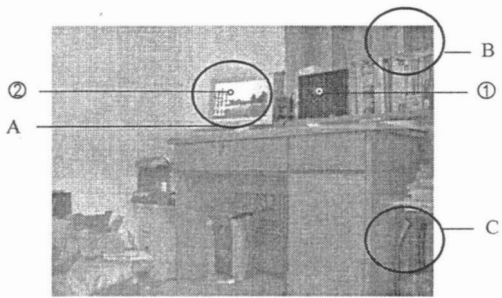


图 5 合成的高动态范围图像

Fig. 5 The constructed high dynamic range image

参考文献:

[1] AGUSANTO K, LI L, ZHU C G, *et al.* Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination [C]// **Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '03)**. Tokyo: IEEE, 2003: 208-216

[2] DEBEVEC P E, MALIK J. Recovering high

dynamic range radiance maps from photographs [C] // **Proceedings of ACM SIGGRAPH '97**. New York: ACM Press, 1997: 369-378

[3] WARD G. High dynamic range image encodings [EB/OL]. [2002-01-01] http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/hdr_encodings.html

[4] DEBEVEC P E. Image-based lighting [J]. **IEEE Comput Graphics and Appl**, 2002, 22(2): 26-34

[5] DEBEVEC P E. HDRI and image-based lighting [C] // **Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003**. San Diego: ACM Press, 2003

[6] 华顺刚,张洁玉,欧宗瑛. 基于图像的光照 [J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(3): 796-798

[7] DEBEVEC P E, MCMILLAN L. Image-based modeling, rendering, and lighting [J]. **IEEE Comput Graphics and Appl**, 2002, 22(2): 24-25

[8] HUA S G, OU Z Y, WANG X D. Constructing full view panoramic image based on spherical model [C] // **Proceedings of SPIE, the International Conference on VR and Application in Industry**. Tianjin: SPIE, 2003: 117-122

[9] WARD G. Real pixels [M] // ARVO J, ed. **Graphics Gems II**. Boston: Academic Press, 1991: 80-83

Constructing high dynamic range image based on photographs with different amounts of exposure

HUA Shun-gang*, WANG Li-dan, OU Zong-ying

(CAD & CG Lab., School of Mech. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract A method of fusing multiple photographs into a high dynamic range image is presented. Based on the assumption of reciprocity, the photographs of the same scene are taken with different amounts of exposure by digital camera. Using the least squares principle and B-spline function, the response curve of imaging process can be recovered, and the mapping relationship between pixel values and exposures is acquired. On the basis of the response curve, a high dynamic range image, in which the pixel values are proportional to the true radiance values in the scene, can be constructed from the multiple photographs. It will cover the entire dynamic range captured by the original photographs, and some details information of high light or black regions in the scene can be made out. The experimental results show that the constructed high dynamic range images are satisfactory.

Key words high dynamic range image; response curve; radiance; irradiance; exposure