

8-7-2020

Constructing Panoramic High Dynamic Range Image Based on Different Amounts of Exposures

Quan Wei

School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

Wang Ying

School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

Yanchun Wang

School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

Xuyang Wang

School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Constructing Panoramic High Dynamic Range Image Based on Different Amounts of Exposures

Abstract

Abstract: A method of constructing panoramic high dynamic range image was proposed. The classical method about different amounts of exposures was adopted by choosing sampling point carefully to generate better response curves for each child camera of the panoramic camera. *Weighted method was applied to obtain panoramic response curve based on six response curves of each child camera.* According to characteristics of spatial frequency, *a template of panoramic image was selected*, so as to complete the synthesis of high dynamic panoramic image. Experiments show that the response curve of panoramic camera can better reflect the characteristics, so the generated high dynamic panoramic image shows details of both high light and dark regions. The results can be used to get luminance information of real scenes, so as a result of it, virtual object illuminating can be implemented in order to obtain the illumination consistency.

Keywords

high dynamic image, panoramic image, response curve, exposure, fusion reality

Authors

Quan Wei, Wang Ying, Yanchun Wang, Xuyang Wang, and Yunrui Zhu

Recommended Citation

Quan Wei, Wang Ying, Wang Yanchun, Wang Xuyang, Zhu Yunrui. Constructing Panoramic High Dynamic Range Image Based on Different Amounts of Exposures[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2531-2537.

基于多曝光的高动态范围全景图像合成

权巍, 王颖, 王艳春, 王旭阳, 朱云瑞

(长春理工大学计算机科学技术学院, 长春 130022)

摘要: 提出了一种合成高动态范围全景图像的方法。采用传统的多曝光算法, 合理选择采样点, 分别求取全景相机各子相机的响应曲线; 再对不同于子相机的响应曲线加权求得全景相机响应曲线; 运用空间频率的方法选取一幅模板全景图像, 从而完成高动态范围全景图像的合成。实验表明, 合成的全景相机响应曲线可以较好地反映全景相机的特性, 根据该曲线生成的高动态范围全景图像较好地展现场景细节信息。根据生成的高动态范围全景图像可获得真实场景的光照信息, 以便完成虚拟物体的照明, 实现虚实融合的光照一致性。

关键词: 高动态范围图像; 全景图像; 响应曲线; 多曝光; 虚实融合

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2531-08

Constructing Panoramic High Dynamic Range Image Based on Different Amounts of Exposures

Quan Wei, Wang Ying, Wang Yanchun, Wang Xuyang, Zhu Yunrui

(School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A method of constructing panoramic high dynamic range image was proposed. The classical method about different amounts of exposures was adopted by choosing sampling point carefully to generate better response curves for each child camera of the panoramic camera. *Weighted method was applied to obtain panoramic response curve based on six response curves of each child camera.* According to characteristics of spatial frequency, *a template of panoramic image was selected*, so as to complete the synthesis of high dynamic panoramic image. Experiments show that the response curve of panoramic camera can better reflect the characteristics, so the generated high dynamic panoramic image shows details of both high light and dark regions. The results can be used to get luminance information of real scenes, so as a result of it, virtual object illuminating can be implemented in order to obtain the illumination consistency.

Keywords: high dynamic image; panoramic image; response curve; exposure; fusion reality

引言

对于相机而言, 动态范围是指场景中最大和最小的亮度值之比。传统的数字成像设备如数码相机只能捕获 2 个数量级范围的图像, 为了较真实地拍

摄高达 10 个数量级范围的自然场景, 避免“过曝”和“欠曝”现象的产生, 扩展传统相机受限的动态范围, 高动态范围成像技术已成为近年来备受瞩目的研究热点。

现如今, 高动态范围成像技术已有了广泛的应用, 如在图像处理、图像绘制、建模、光照摄影学以及虚拟现实^[1]等方面。高动态范围成像技术不仅可以应用于照明真实对象的模拟和计算机生成对象的构建^[2]并渲染, 还可以避免在进行图像绘制、



收稿日期: 2015-06-09 修回日期: 2015-07-24;
基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204050GX);
作者简介: 权巍(1981-), 女, 吉林, 博士, 讲师, 研究方向为计算机视觉、数字图像处理; 王颖(1992-), 女, 河南, 硕士, 研究方向为图像处理、虚拟现实。

<http://www.china-simulation.com>

• 2531 •

建模以及图像合成过程中,因拍摄方向和曝光量不同等因素致使的图像间亮度、色调差异等现象。早期的增强现实的立体电影制作,光照效果的解决方案多是虚拟布光和后期调整,这种方法只能提供一种近似的逼真感,无法做到物理层面的逼真。真实场景中的光照相当复杂,比如有来自天空光、面光源等直接光照以及物体之间相互反射而产生间接光照,这些很难用计算机图形学中的虚拟光源表示,而采用基于图像的光照,其核心技术是记录真实场景光照信息载体的获取,即:高动态范围全景图像的合成。

目前,已经有很多合成高动态范围图像的方法,Debevec-Malik 算法^[3]与 Nayar^[4]算法,很多学者对它们进行了改进。对于高动态范围全景图像,主要有三种方法^[5]:第一种是模拟光线和基于物理光照模型的合成图像^[6],另外一种方式是拍摄多幅从不同方向观看的图像照片,然后使用图像拼合技术把它们结合起来,每次拍摄较大覆盖区域的一个好办法是使用鱼镜头,可以使用最少两幅图像来覆盖全部区域,由此来生成高动态范围全景图像。但是这两种方法存在操作和算法复杂的缺点。还有一种方式,用特殊的硬件设备来直接拍摄高动态范围(high dynamic range, HDR)图像^[7-8]。

最常使用的获得全景图像的一种方法就是使用全景相机。全景相机也可以拍摄不同曝光量^[9-10]的全景图像合成 HDR,故全景相机可以当作合成 HDR 图像的图像采集设备,从而完成 HDR 图像的合成工作。由于全景相机可以拍摄出单相机无法达到的广角效果,甚至是近乎于 360 度的全方位图像,以及可以用于增强现实作为图像光照的特殊性,所以研究高动态的全景图像有着深远的意义。目前已经有很多全景相机具有这样的功能,但是由于各种原因,效果并不理想,例如目前加拿大 PointGrey 公司的 Ladybug3^[11]全景相机中有一种现成的 HDR 模式^[12],它通过设置快门时间以及仅限 4 次的曝光直接从利用全景图像生成高动态全景图像,但是由于该模式的曝光次数等的局限性,以

及直接使用一组不同曝光度的全景图像来合成高动态全景图像^[13]的不合理性,其合成效果并不理想,鲁棒性不高,会出现在一些强灯光区域存在光晕、在一些黑暗区域会丢失大量细节的情况。

本文在研究和分析了传统的 HDR 图像生成算法以及全景相机成像原理的基础上,围绕生成相机响应曲线的基本原理^[3],针对全景相机系统中的 HDR 模式进行了改进,运用响应曲线再次拟合的方法,并用空间频率^[14]的方法选出特殊领域清晰部分所在的图像,提出了一种适用于全景相机的高动态范围图像的生成算法,从而在图像清晰度和生成效率等方面得到较大提升。

1 相机响应曲线的合成

数码相机成像过程如图 1 所示,该过程基于光电学理论,一般利用 CCD 来成像。虽然 CCD 器件收集到的电荷输出是正比于其照度的,但在这些输出被写到存储介质上时,数码相机都会对应一个非线性的映射,其作用是为了模拟胶片成像中的特征响应。这个非线性的映射构成了曝光量 X 与最终像素值 Z 之间的非线性关系。定义相机响应函数 f 描述曝光量 X 与最终像素值 Z 的非线性关系:

$$Z = f(X) \quad (1)$$

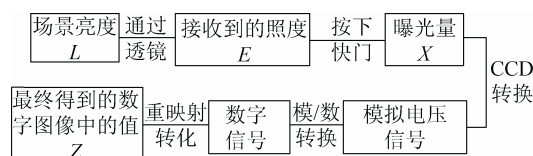


图 1 数码相机的成像过程

由光学成像系统原理可知,相机接收到的照度值 E 与场景中对应点的亮度值 I 是成正比的,即有 $E = qI(d/f)^2$,其中 q 是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^[15]。

曝光量可以使用公式(2)表示,式中 Δt 是快门时间。计算相机响应函数所需的输入参数为一组拥有不同的曝光时间 Δt_j 的数字化图像,其中曝光时间 Δt_j 需满足一定阈值 ($\Delta t_j \leq \zeta$),以实现所拍摄场

景是相对静止的,于是可以得到图像中的像素值与曝光量之间的关系,如公式(3)所示,式中 Δt_j 表示第 j 张图片的曝光时间, E_i 表示图像中第 i 个位置上的辐照度, Z_{ij} 表示第 j 张图片第 i 个位置上的像素值。现进行合理的假设 f 是单调递增的,因此可对公式(3)求逆,得到公式(4)。

$$X = E\Delta t \quad (2)$$

$$Z_{ij} = f(E_i\Delta t_j) \quad (3)$$

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i\Delta t_j \quad (4)$$

通过对公式(4)取对数得公式(5),定义 $g() = \ln f^{-1}()$ 则对公式(5)进行化简,得到公式(6)。

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (5)$$

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (6)$$

在恢复函数 g 和辐照度 E_i 时,由于传统数字图像的像素 Z_{ij} 范围是有限的,则恢复对应的函数值 g 也只需要有限数目的值。令 Z_{\min} 和 Z_{\max} 表示为像素值(整数)的最小值和最大值。 N 表示像素值的数亮, P 表示图片的数量。可以归结这个问题为求 $(Z_{\max} - Z_{\min} + 1)$ 个 $g(Z_{ij})$ 的值和 N 个 $\ln E_i$ 的值,为此,只需转化为对最小二乘目标函数的求解过程。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 = 0 \quad (7)$$

在(7)式中引入平滑项 $g''(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1)$ 来平滑 $g(x)$ 函数。

为了保证公式(7)的超静定性,需满足公式(8):

$$N(P-1) > (Z_{\max} - Z_{\min}) \quad (8)$$

设一个 $P \times N$ 行 $P \times N + N$ 列的增广矩阵 A ,它是由一个 $P \times N$ 维的单位矩阵与一个以 N 维单位矩阵为元素的 $P \times N$ 行 1 列的矩阵构成。以重复度 N 的列向量(记录的是每幅图像曝光的对数)为元素的 P 行 1 列矩阵,记为 B 。构造方程:

$$AX = B \quad (9)$$

对上式求解 X ,由此可以解得 $P \times N$ 个像素值对应的亮度值,进而由最小二乘法可以求得相机响

应曲线。

采样点的选取对相机响应曲线的合成也有着至关重要的作用。

本文采用了六张曝光度不同的图像,由公式(8)中采样点的个数和图像张数之间的不等式关系可知在每幅图像中应最少选取54个采样点,考虑到画出过多的点会造成读者无法在图像中清晰地看到点之间的位置关系等现象,故本文在每幅图像中只画出9个采样点,如图2(a)所示。定义坐标轴的横坐标为像素值,纵坐标为曝光量的对数值。其次,由于不知道曝光量的绝对数值,因此假设每一组点的照度值 E 均为1,则采样点的纵坐标值随曝光时间而定;而实际上不同点的照度值 E 并不相同,众所周知,图像的曝光量越大,像素值就越大,也就是说,曝光量与图像像素值的函数关系是单调递增的,因此,可以保证函数递增的性质上下平移每组的9个采样点以得到平滑的曲线。最后,基于这一原理便可拟合出光照响应曲线。

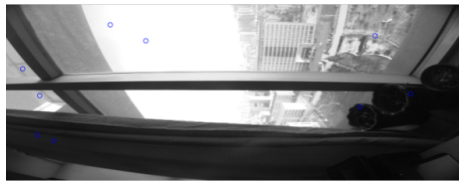
此外,多次实验表明:采样点的选择决定了曲线恢复的效果。采样点的选择需保证采样点分布在图像的整个亮度区间。可以采用将图像的亮度区间划分成 P 份,根据相机拍摄场景的光照程度,决定给在每个区间选择点数的多少,但是应尽量保证在每个范围区间内进行采样。如图2所示,图2(a)和图2(b)为全景相机的一个侧面摄像头所拍图像的不同取点示意图,图2(c)和图2(d)为对应选点方法生成的响应曲线,其中图2(a)为本文提出的采样点选取方法,图2(b)是一种集中式的采样点选取方法。由两者所对应的响应曲线可知,本文提出的采样点选取方法效果较好。

2 高动态范围全景图像合成算法

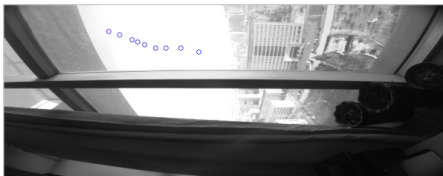
2.1 全景相机响应曲线的合成

全景相机是一种由多个镜头子相机组成运用相关的图像拼接技术生成几近全方位图像的软硬件设备,由于不同子相机的性能略有差异(对于高要求的拍摄效果,该差异不能忽略),不同性能的

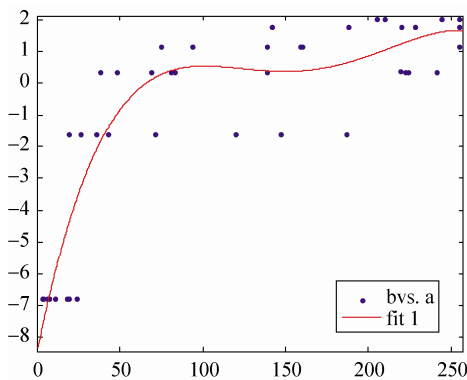
相机的响应曲线也存在着不同,而相机响应曲线的合成是生成高动态图像最重要的步骤,因此,传统的适用于普通相机的 HDR 生成算法,对于全景相机不再适用。故本文从 Ladybug 系列相机的 6 个子相机的响应曲线的差异出发,求同存异,进而将问题转化为如何在保留分镜头差异性的前提下,减少误差,合成全景相机响应曲线的问题。



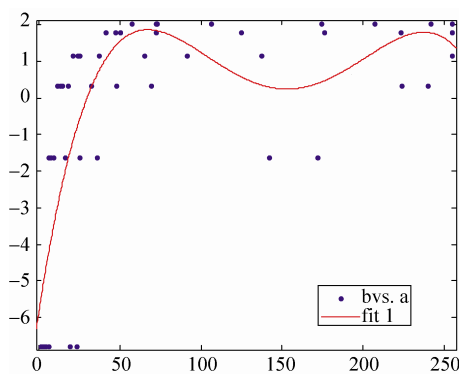
(a) 本文的采样点选取策略



(b) 随机的采样点选取



(c) 基于图(a)的采样点生成的相机响应曲线



(d) 基于图(b)的采样点生成的相机响应曲线

图 2 采样点的选择和曲线合成结果示意图

相机响应曲线反映的是场景图像中像素点辐射度值和亮度值之间的关系,由于全景相机的相机结构和成像原理,以及分镜头所拍摄场景的不同,某一亮度范围采样点的个数将会不同。由于连续的响应曲线是由离散的采样点数据拟合而成,故同一条曲线上会随着采样点的连续程度呈现不同的精确度,例如,在相同的亮度范围内,由 10 个采样点拟合的曲线段要比 5 个采样点拟合的等长曲线段精确高。所以在本文提出的方法中,使用一组由各分镜头加权合成的响应关系作为全景相机的响应关系。假设对各分镜头的响应曲线分配不同的权值,精确度高和低的曲线段的比例都会被增加,从而可能会导致其他分镜头的场景图像出现信息丢失、欠曝或者过曝等现象。因此,为了保证生成的全景图像更加细腻,承载的信息量更加丰富,本文采用等分权值的方法,即平均值法,从而可以避免图像画质不均衡的现象。即:

$$f(x) = W_1 f_1(x) + W_2 f_2(x) + W_3 f_3(x) + W_4 f_4(x) + W_5 f_5(x) + W_6 f_6(x) \quad (10)$$

其中: $f_i(x)$ 表示 6 个镜头的相机响应曲线函数, $W_i = 1/6, i=1,2,3,4,5,6$ 。

2.2 高动态范围全景图像合成

合成高动态范围全景图像包括如下两个步骤:

① 根据全景相机响应曲线得出图像像素值和场景亮度值之间的转换关系;

由公式(6)可得

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (11)$$

利用公式(9)即可求出实际场景的照度,可以使用 P 幅图像来计算像素的照度值,以减少误差:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j}{P} \quad (12)$$

式(10)只是场景辐射度的相对值,也就是亮度 I 的相对值,为了确定曲线的位置,引入额外的约束, $g(Z_{mid})=0$, 其中 $Z_{mid} = 1/2(Z_{max} + Z_{min})$, 使得在 Z_{min} 和 Z_{max} 中间的这个值具有单位曝光量。

② 选取模板全景图像

合成高动态范围图像时, 需要一副参考图像, 我们总是希望尽可能地保留图像中的各种细节信息, 如从室内拍摄窗外时, 既希望保留室内的细节, 又希望可以看见窗外的场景。所以, 需要在这一组曝光度不同的全景图像中选出该特殊区域最清晰的部分作为合成高动态范围全景图像的模板图像。该特殊区域的选取根据经验认为最难保留细节的部分, 如本文所选为窗外场景。

如一副 $M \times N$ 大小的图像, 其行(M)和列(N)的空间频率分别为 RF 和 CF , 公式如下:

$$RF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} [F(m, n) - F(m, n-1)]^2} \quad (13)$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [F(m, n) - F(m, n-1)]^2} \quad (14)$$

$$SF = \sqrt{(RF)^2 + (CF)^2} \quad (15)$$

其中, $F(m, n)$ 为灰度图像 F 在 (m, n) 点的灰度值, SF 为图像 F 的空间频率。

分别比较这在这组曝光度不同的图像中, 所划分区域 SF 的大小, 通过比较多幅图像中同一区域的空间频率 SF , 空间频率最大的区域即为清晰区域。

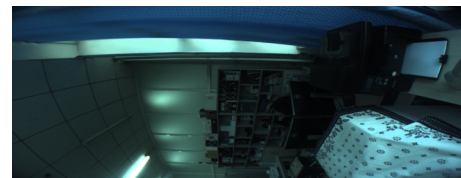
3 高动态范围全景图像存储

高动态范围图像记录亮度的方式与传统的图像不同, 不是用非线性的方式将亮度信息压缩在 8bit 或 16bit 这种有限的颜色空间内, 而是用直接对应的方式记录亮度信息, 它记录了图像环境中的照明信息, 所以需要更大的存储空间。本文采用 Ward 提出的 32 位 RGBE(Red-Green-Blue-Exponent) 存储格式, 它使用 3 个字节来存储 RGB 值(即红、绿、蓝各占一个字节)以及一个字节来存储指数 E (exponent)值。这个值为红、绿、蓝三个值共享, 高动态范围图像存储的扩展名为 .hdr。

4 实验结果与分析

4.1 相机响应曲线实验结果分析

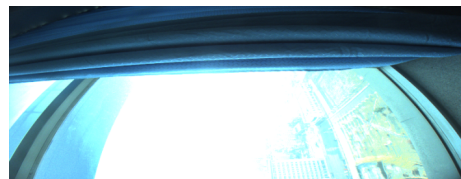
如图 3 和图 4 所示, 分别为全景相机各子相机对应的一幅图像和该子相机在一组不同曝光量下合成的相机响应曲线。



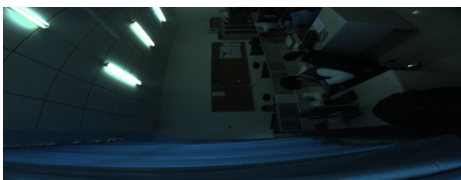
(a) 全景相机子相机 0 拍摄的图片



(b) 全景相机子相机 1 拍摄的图片



(c) 全景相机子相机 2 拍摄的图片



(d) 全景相机子相机 3 拍摄的图片



(e) 全景相机子相机 4 拍摄的图片



(f) 全景相机子相机 5 拍摄的图片

图 3 Ladybug3 全景相机 6 个子相机拍摄的一组图像中的一幅

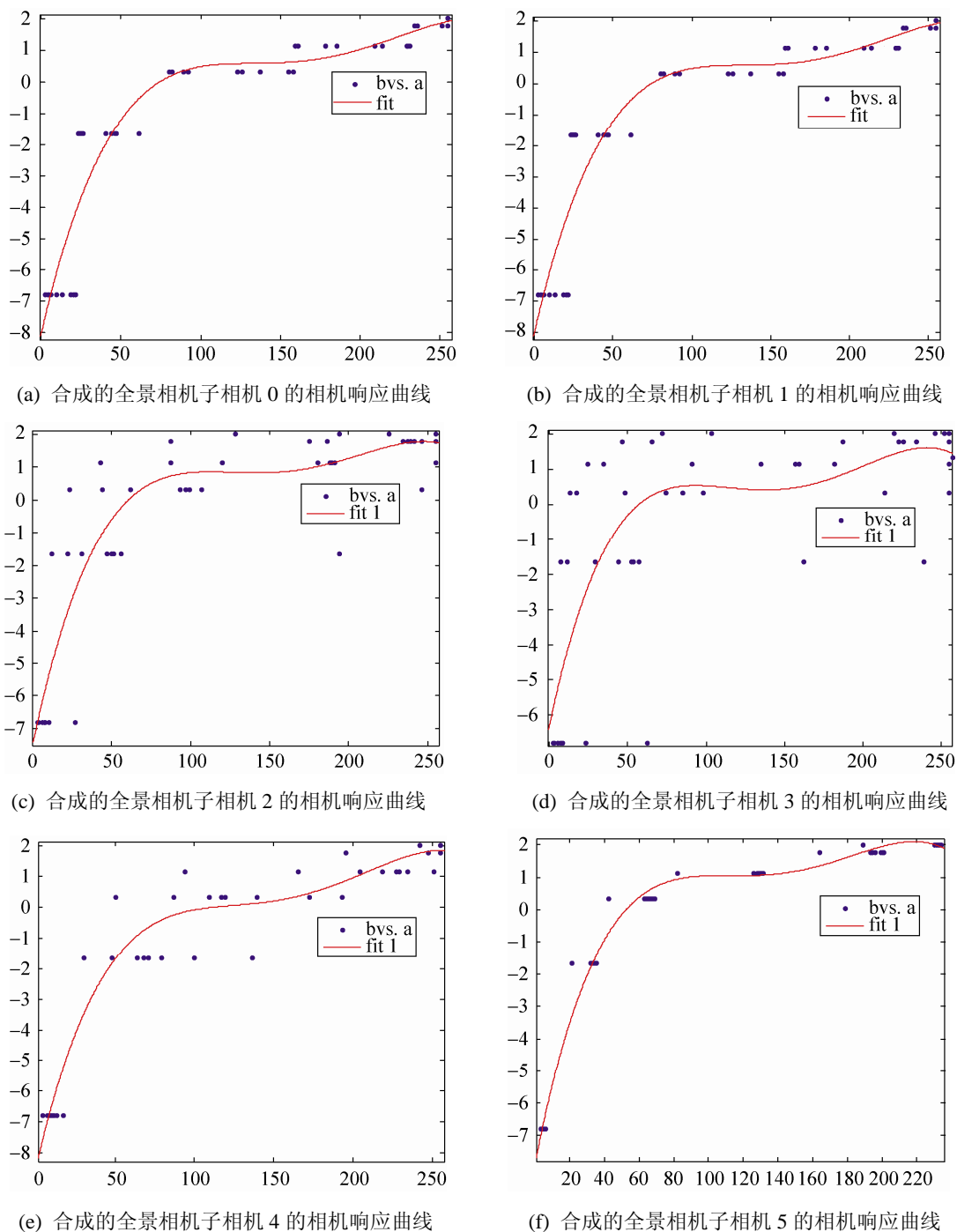


图 4 Ladybug3 全景相机六个子相机对应的相机响应曲线

图 5 是六个子相机对应的相机响应曲线进行加权之后得到的全景相机响应曲线。

图 6 为 Ladybug3 全景相机所拍摄全景图像将作为合成全景相机高动态范围图像过程中所用到的模板图像。实验结果如图 7 所示，图 7 为根据全景相机响应曲线合成的高动态范围全景图像。

如图所示，图 6 中动态范围有限，每幅图像中都有或亮或暗的场景信息无法展现；而如图 7 实验得到的高动态范围全景图像，不论是房间里的场景，如人物桌椅、电灯，还是窗外的风景，细节信息都得以很好的展现。由于显示设备的动态范围有限，为了展示高动态范围图像，图 7 为经过色调映

射处理后的图像。尽管色调映射处理使得图像的色度信息受到影响, 导致对比度下降, 部分细节信息丢失, 但仍能明显地看出它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。本文中合成的高动态范围图像动态范围为 1.8964×10^6 , 反映了图像真实的亮度变化情况。

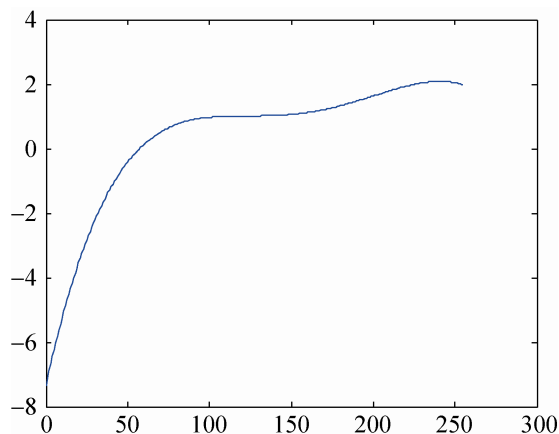


图 5 合成的 Ladybug3 全景相机响应曲线



图 6 模板全景图像



图 7 合成的高动态范围全景图像

4.2 高动态范围全景图像在虚拟场景中的应用

高动态范围全景图像可以附着在 maya 中的 HDR 环境球上, 对球内的一个虚拟物体如汽车模型进行真实光照映射, 如图 8 所示, 可以实现将光照信息条件照射在汽车模型上, 保证了虚实融合的光照一致性, 从而呈现真实的虚实融合效果。

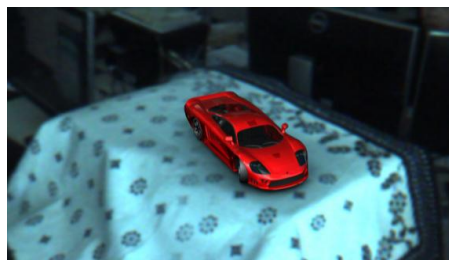


图 8 高动态范围图像的应用

5 结论

本文提出了一种合成高动态范围全景图像的方法。该方法首先通过恢复 Ladybug3 全景相机 6 个子相机的相机响应曲线, 合成得到全景相机响应曲线。其次, 根据空间频率的方法选出模板全景图像, 将该图像应用于全景相机响应曲线, 合成高动态范围全景图像。实验表明, 合成的图像很好的展现了场景中高亮区和暗区的细节信息。研究成果应用 maya 中的 HDR 环境球上, 可成功的利用全景图像中的光照信息设置虚拟场景的光照, 得到虚实无缝融合的效果。

参考文献:

- [1] 朱秀明. 高动态范围图像的合成及可视化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] P.Debevec. Image-based lighting [J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2002, 22(2): 26-34.
- [3] P E Debevec, J Malik. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs [C]// SIGGRAPH97 Conference Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. USA: ACM, 1997: 369-378.
- [4] Shree K Nayar, Tomoo Mitsunaga. High dynamic range imaging: spatially varying Pixel exposures [C]// IEEE Computer Society Conference Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2000: 472-479.
- [5] Grossberg M D, Nayar S K. What is the space of camera response functions [C]// IEEE Computer Society Conference Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2003, vol 2: II-602-9.
- [6] Larson G W, Shakespeare R. Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization (ISBN: 1-55860-499-5) [M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.

(下转第 2545 页)