

一个稳健的用于 HDR 图像的相机响应函数标定算法

章卫祥 周秉锋

(北京大学计算机科学技术研究所 北京 100871)

摘 要 在 Mitsunaga 和 Nayar 给出的多项式模型的基础上,增加了图像亮度为 0 映射到场景亮度也为 0 的限制条件,并改进了迭代结束条件,所得到的新的标定算法可以使用多张不同曝光度的图像来标定相机响应函数,不同曝光度可以通过改变相机的光圈大小和曝光时间长短来得到.文中所述算法可以自动估计并最后求得精确的曝光光度比,省略了原有算法需要输入曝光光度比估计值的步骤.算法得到了相机响应函数后,可用多张不同曝光度的图像合成高动态范围的图像.和原有算法相比,此算法的稳健性得到了很大提高,实验表明它对所选的所有输入图像都能收敛,并且得到最优解.

关键词 相机响应函数;曝光度;HDR(高动态范围)

中图法分类号 TP391

A Robust HDR Image Calibration Algorithm for Camera Response Function

ZHANG Wei-Xiang ZHOU Bing-Feng

(Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract In this paper, a robust calibration algorithm based on a polynomial model is presented. To improve the robustness of the original polynomial model, a new constraint is added so that the pixels with zero brightness are forcedly mapped on to the zero scene radiance. The ending condition of the iterative procedure is also refined in this work, which makes it possible to approach the best solution. The algorithm can calibrate the camera response function from multiple differently exposed images for an arbitrary scene. The different exposures are obtained by changing either the aperture setting or the shutter speed of the camera. The proposed algorithm does not require the exposure ratio of the images; it instead estimates the ratio automatically and can finally get the precise ratio of exposure. With the camera response function obtained, multiple images can be fused into a single high dynamic range radiance image. Compared with the algorithm proposed by Mitsunaga in 1999, the algorithm is more robust and is able to obtain more precise solution. The results show that the algorithm works well for all the images experimented.

Keywords camera response function; exposure; HDR(High Dynamic Range)

1 引 言

高动态范围 HDR(High Dynamic Range)图像

在计算机图形学中有着重要的应用,在基于图像建模和绘制、图像拼接、图像处理(例如运动模糊)等领域都比传统图像有很大的优势.动态范围是指图像中最大像素值与最小像素值的比.传统图像用整数

收稿日期:2004-03-23;修改稿收到日期:2005-10-11.章卫祥,男,1979年生,硕士,研究实习员,研究方向为数字图像处理,包括基于小波变换的图像视频压缩、高动态范围图像及其应用、有交互的图像前景提取等. E-mail: zhangweixiang@icst.pku.edu.cn.周秉锋,男,1963年生,博士,研究员,博士生导师,研究领域包括机器人运动学图形模拟、几何造型和 CAD/CAM、彩色图像处理、多媒体系统与图形特技、数字图像半色调、基于图像的绘制与建模和虚拟现实等.

来代表像素值,像素值与实际亮度不是线性比例关系,只能表示 256 个亮度级,而实际自然场景中动态范围高达 $100000000:1$ ^[2],这在传统图像中无法表示;与传统图像不同,HDR 图像用浮点数来表示像素值,可以完全表示出自然场景中的动态范围,而且其像素值是实际场景亮度的线性映射,给处理带来很大的方便和好处,因为许多图像处理方面的算法假设像素值和实际亮度是成线性关系的^[1].

HDR 图像的获取方法主要有三类:第一类是模拟光线和基于物理光照模型的合成图像^[3],早期 HDR 图像的来源主要是这一类;第二类是用多张不同曝光度的普通图像来计算实际亮度,得到 HDR 图像^[1,4,5];第三类使用各种新的硬件设备来直接拍摄 HDR 图像^[6,7].第一类方法中都是人工合成的图像,不能处理自然图像,第三类方法需要特殊的设备,第二类只需普通相机拍摄几张不同曝光度的图像就可以得到 HDR 图像,因此具有较好的应用价值.在这类技术中,一个重要的关键步骤是要正确标定相机响应函数.在文献[1]中,从场景亮度到图像亮度的映射被定义为相机的响应函数.

Mann 和 Picard 第一次试图以多张不同曝光度的图像来合成 HDR 图像^[4],但结果不让人满意. Debevec 和 Malik 提出的方法^[5]可以得到好的结果,但是必须精确知道不同图像曝光度的比,给实际操作带来很大麻烦. Mitsunaga 和 Nayar 提出的方法只需要用户给出曝光度比的粗略估计值^[1],但是其算法稳健性不好,当迭代结束条件精度设置稍高时容易发散,而且当曝光度比的估计值偏离正确值稍大时会收敛到错误的结果.本文对 Mitsunaga 和 Nayar 的方法作了改进,使之稳健性大大提高,并且不需要给定初始曝光度比.实验结果表明,对实验中所使用的所有图像都能收敛得到最优解.

本文第 2 节将介绍多张不同曝光度图像合成 HDR 图像的背景;第 3 节介绍标定相机响应函数的算法;第 4 节介绍合成 HDR 图像的算法;第 5 节给出实验结果.

2 背景

大多数情况下,图像系统的响应函数都是一个非线性的映射.在一般的成像系统中,图像的辐照度(irradiance)和场景的辐射度(radiance)有下面的关系^[1]:

$$E = L \times \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d}{h}\right)^2 \times \cos^4 \phi \quad (1)$$

其中 E 为图像辐照度, L 为场景辐射度, h 为镜头的焦距, d 为光圈的直径, ϕ 为光线和光轴所成角度.对理想的图像系统,图像亮度记录的应该是 $I = E \times t$, t 为曝光时间.这个理想的系统有线性的响应函数:

$$I = L \times k \times e \quad (2)$$

其中 $k = \frac{\cos^4 \phi}{h^2}$, $e = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times t$,我们认为 e 是图像的曝光度,可以通过改变光圈大小和曝光时间长短来改变.

一般系统中, $M = g(I)$, M 为图像亮度, g 为响应函数.假设响应函数 g 是单调的,则 g 有逆函数 f , $I = f(M)$.由多张曝光不同的图像合成 HDR 图像,关键就是要算出响应函数的逆函数 f .由于 f 是 g 的逆函数,知道了 f 就可以求得响应函数 g ,为了叙述简便,后面直接称 f 为响应函数.

Mann 和 Picard 用函数 $M = \alpha + \beta \times I^\gamma$ 来模拟响应函数^[4].位移参数 α 通过遮住相机镜头拍摄相片来得到.伸缩参数 β 设为任意值.两张图像的曝光度比为 $R = \frac{e_1}{e_2}$.第一张图像中值为 $M(I)$ 的像素对应第二张图像中值为 $M(R \times I)$ 的像素, I 未知.第一张图像中亮度值为 $M(R \times I)$ 的像素在第二张中值为 $M(R^2 \times I)$.这样可以得到一系列的亮度 $M(I)$, $M(R \times I)$, \dots , $M(R^n \times I)$.通过这些点来计算第 3 个参数 γ .由于所使用的模型有很大的限制,在最佳的情况下也只能得到一个定性的标定结果.

Debevec 和 Malik 使用一组知道精确曝光度的图像,可以得到更精确的结果^[5].与以前的不同,这个算法对响应函数没有严格的限制,只要是连续的.下标 p 表示不同像素,下标 q 表示不同曝光度,则 $M_{p,q} = g(E_p \times t_q)$,或者 $\ln f(M_{p,q}) = \ln E_p + \ln t_q$.知道 $M_{p,q}$ 和 t_q ,求解 $\ln f(M_{p,q})$ 和 $\ln E_p$.此方法适用于已知精确的曝光度而且图像噪声较小的情况.

Mitsunaga 和 Nayar 用 N 次多项式来模拟响应函数^[1].使用曝光度比的估计值(曝光时间 \times 光圈 F 值的倒数的平方)来计算多项式的系数,然后用计算出来的多项式重新估计曝光度比,重复上述过程,如果算法收敛,就得到了响应函数和精确的曝光度比.

本文采用 Mitsunaga 和 Nayar 的 N 次多项式模型^[1],增加了图像亮度为 0 映射到场景亮度也为 0 的附加条件,使之稳健性大大提高,在我们的实验中,新算法对所选择的所有输入图像都能收敛,并且不需要输入曝光度比,同时改变了迭代结束条件,

使算法能得到最优解。

3 标定相机响应函数算法

任何响应函数都可以用一个高阶的多项式来描述^[1]：

$$I = f(M) = \sum_{n=0}^N c_n M^n \quad (3)$$

其中, N 为多项式的阶, c_n 为多项式 n 次项的系数. 多项式阶的最小值和响应函数本身有关. 这样, 标定的过程就是求解 N 和各个 c_n .

假设同一场景的两张图像曝光度分别为 e_q 和 e_{q+1} , 那么, 曝光度比为 $R_{q,q+1} = \frac{e_q}{e_{q+1}}$. 在任一个像素 p 点, 两张图像对应的 I 的比可以利用式(2)写为

$$\frac{I_{p,q}}{I_{p,q+1}} = \frac{L_p \times k_p \times e_q}{L_p \times k_p \times e_{q+1}} = R_{q,q+1} \quad (4)$$

利用式(3)得

$$\frac{f(M_{p,q})}{f(M_{p,q+1})} = R_{q,q+1} \quad (5)$$

在 Mitsunaga 和 Nayar 的工作中, 标定算法对图像进行排序, 使得 $e_q < e_{q+1}$, 因此有 $0 < R_{q,q+1} < 1$. 代入多项式模型式(3)得到

$$\frac{\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n}{\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n} = R_{q,q+1} \quad (6)$$

式(6)是标定响应函数和求解精确曝光度比的主要关系式。

如果曝光度比 $R_{q,q+1}$ 是已知的, 那么响应函数可以通过方程(6)得到的误差函数来求解:

$$\epsilon = \sum_{q=1}^{Q-1} \sum_{p=1}^P \left[\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n - R_{q,q+1} \times \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n \right]^2 \quad (7)$$

Q 是所用图像的总数. M 规格化到 $0 \leq M \leq 1$, 并且令 $f(1) = I_{\max}$, 得到附加条件:

$$C_N = I_{\max} - \sum_{n=0}^{N-1} c_n \quad (8)$$

响应函数的系数通过解下面式子导出的线性方程组来得到:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial c_n} = 0 \quad (9)$$

使用普通的照相设备很难得到精确的曝光度比, 得到的一般都是粗略的估计. 精确的曝光度比可以通过迭代来求得. 当前的曝光度比 $R_{q,q+1}^{(k-1)}$ 用来计算下一次迭代的系数 $c_n^{(k)}$, 然后利用式(6)来更新曝光度比:

$$R_{q,q+1}^{(k)} = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n}{\sum_{p=1}^P \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n} \quad (10)$$

算法使用的最初曝光度比 $R_{q,q+1}^{(0)}$ 由使用者给出. 算法满足下面的条件时停止迭代:

$$|f^{(k)}(M) - f^{(k-1)}(M)| < \delta, \forall M \quad (11)$$

其中 δ 为一个少量。

这个算法无法确定 N 的值, 在实际操作中可以取一个上限, 然后多次执行算法来找到使 ϵ 最小的 N . 实验表明上限可以取为 5~10 之间. 对于彩色图像, 认为 R, G, B 三个分量的响应函数是独立的, 分别进行标定。

上述算法有一个严重的问题, 就是很容易发散, 如图 1 所示. 图中横轴为图像亮度 M , 纵轴为场景亮度 I , M 和 I 的取值都是 $0 \sim 1$ 之间, 三条曲线分别为 R, G, B 三个分量的响应函数 f . 左边为迭代刚开始的图像, 右边为迭代已经开始发散的图像, 可以看出, $f(0)$ 已经偏离 0, 开始逐渐变大, 随着迭代过程继续进行, $f(0)$ 不断增大, 最后 R, G, B 三个响应函数都变成恒等于 1.

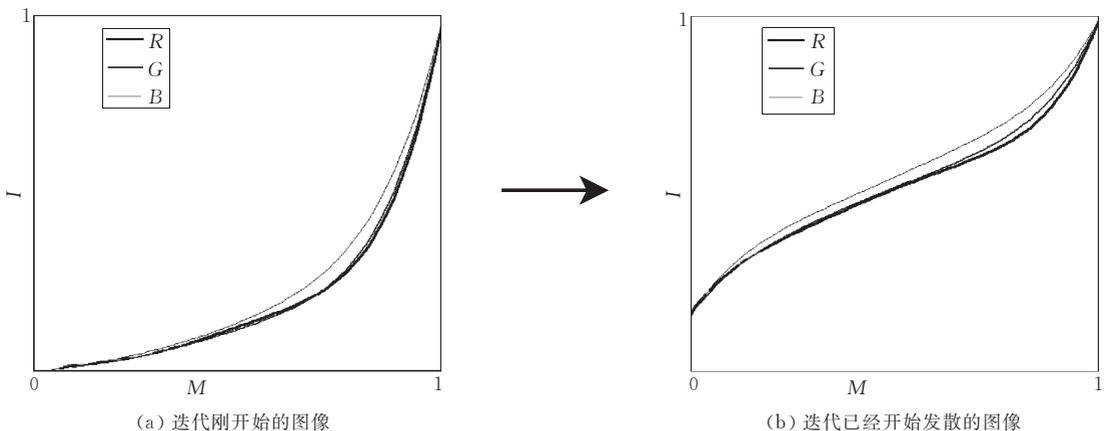


图 1 标定相机响应函数发散情况($f(0)$ 的值不断增大, 最后趋向于整个函数 f 都等于 1)

在上面的发散的情形中,每次迭代的目标都是要使式(7)误差函数 ϵ 变小,而当相机响应函数趋于恒等于 1,曝光度比也趋于 1 的时候,误差函数 ϵ 也越来越小,趋向于 0. 迭代几次后就产生了一个不合理的现象,即 $f(0)$ 的值在不断增大. 而在正常的情况下,像素值为 0 时对应实际场景的亮度也应该是 0. 为了解决这个问题,我们增加了一个附加条件: $f(0)=0$,即

$$C_0 = 0 \quad (12)$$

增加这个条件后,迭代过程将能够达到收敛. 图 2 是算法收敛的情形(横、纵坐标同图 1),其中,三条曲线为已经收敛的 R, G, B 三个响应函数,输入图像如图 3 所示, N 上限设为 5,算法收敛得到多项式系数如表 1 所示. 新算法非常稳定,对原来要求人工输入的初始曝光度比 $R_{q,q+1}^{(0)}$ 不敏感,将曝光度比用图像像素平均值的比来估计,即

$$R_{q,q+1}^{(0)} = \frac{\sum_{p=1}^P M_{p,q}}{\sum_{p=1}^P M_{p,q+1}} \quad (13)$$

也都能收敛到正确结果,因此,原来需要输入的初始曝光度比可以由算法自动完成.

表 1 多项式的系数

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
R	0.370587	-1.691921	6.043918	-7.755468	4.032884
G	0.338371	-1.265634	5.031324	5.031324	3.319679
B	0.446871	-2.184121	8.123281	-10.92621	5.540179

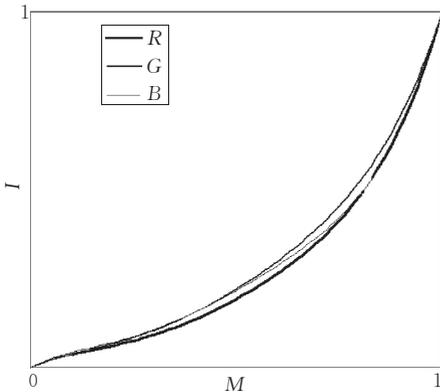


图 2 增加附加条件 $f(0)=0$ 后的情形(迭代过程收敛)

在迭代过程中,误差函数 ϵ 不断减小,当 ϵ 达到最小值时,所得到的解是最优解. 而文献[1]给出的迭代结束判定条件式(11)并没有反映这个情况,只是当迭代一次后,响应函数的变化小于某个给定的阈值时即停止迭代,因此得到的结果不是最优解. 为此,我们使用了如下的迭代结束判定条件:

$$\epsilon_k \geq \epsilon_{k-1} \quad (14)$$

这样迭代结束时 ϵ 取得了最小值,而以此获得的响应函数和曝光度即是最优值.

4 合成 HDR 图像算法

得到响应函数后,高动态范围图像可以通过 3 个步骤来合成[1]. 首先,每张图像像素值 M 通过响应函数映射到实际场景的亮度 I ,

$$I_{p,q} = \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n \quad (15)$$

其次,根据前面标定相机响应函数时得到的精确曝光度比将所有图像的场景亮度 I 线性缩放到同一曝光度,

$$I'_{p,q} = I_{p,q} \times \prod_{i=1}^{q-1} R_{i,i+1} \quad (16)$$

最后,各个图像加权平均得到最终的 HDR 图像,

$$I_p = \frac{\sum_{q=1}^Q \omega(M_{p,q}) \times I'_{p,q}}{\sum_{q=1}^Q \omega(M_{p,q})} \quad (17)$$

ω 为权重函数. 越可靠的数据权重应该越大,相机的信噪比正好描述这个性质,

$$SNR = I \frac{dM}{dI} \frac{1}{\sigma_N(M)} = \frac{f(M)}{\sigma_N(M) f'(M)} \quad (18)$$

$\sigma_N(M)$ 是标准差,和像素值 M 无关,所以定义权重函数为

$$\omega(M) = f(M) / f'(M) \quad (19)$$

5 实验结果

我们对多组不同来源的图像进行了实验,部分实验结果如图 3、图 4、图 5 所示,其中首张图像都是由其后的源图像合成的 HDR 图像经过动态范围压缩得到[2,8,9]. 图 3 使用的是 Nikon CoolPix 5400 数码相机拍摄的不同曝光度的图像,图 4 使用的是文献[8]中提供的图像,图 5 中的源图来自 CAVE(Columbia Automated Vision Environment)实验室.

文献[1]的方法当式(11)中的 δ 设为 0.001 时,只有部分能够收敛,例如,对图 3、图 4、图 5 使用的源图像而言,该方法对图 3、图 4 收敛,对图 5 则发散;当 δ 设为 0.0001 或更小时,全部发散. 使用我们的附加条件 $f(0)=0$ 后,算法对所有图像都能够收敛,并且由于收敛条件改成了式(14),最后求得的是最优解.

图 3 源图的精确曝光度比依次为 0.55053, 0.56756, 0.54970, 0.53120, 0.55351, 0.54177, 0.57051, 0.54291. 文献[1]的方法在初始曝光度比设为 0.4~0.6 时($\delta \geq 0.001$), 能够收敛, 得到近似

结果; 初始曝光度比设为大于 0.6 时, 全部发散; 初始曝光度比设为小于 0.4 时($\delta \geq 0.001$), 虽然能收敛, 但得到的是一个错误结果. 本文的方法任意设置初始曝光度初始值都能够收敛得到最终的精确结果.



图 3 实验结果 1(首张图像是由后 9 张合成的 HDR 图像经过动态范围压缩得到, 后 9 张是用 Nikon CoolPix 5400 数码相机拍摄的不同曝光度的图像)



图 4 实验结果 2(首张图像是由后 9 张合成的 HDR 图像经过动态范围压缩得到, 后 9 张来自文献[8], <http://www.cs.huji.ac.il/~danix/hdrc/>)



图 5 实验结果 3(首张图像是由后 5 张合成的 HDR 图像经过动态范围压缩得到, 后 5 张来自 CAVE (Columbia Automated Vision Environment, <http://www.cs.columbia.edu/CAVE>) 实验室)

6 小 结

由多张不同曝光度的图像来标定相机响应函数和合成 HDR 图像的思想首先由 Mann 和 Picard 提出^[4], Debevec 和 Malik 使之达到实用^[5], 但必须预先知道图像之间精确的曝光度比, 而普通的图像采集设备通常无法得到精确的曝光度比. Mitsunaga 和 Nayar 用多项式来模拟相机响应函数^[1], 需要事先给出输入图像间曝光度比的粗略估计值, 并通过迭代, 来求得相机响应函数和精确的曝光度比. 该算

法不够稳健, 当迭代结束条件精度设置稍高时, 很容易发散; 而且, 当预先给定的曝光度比估计值偏离真实值稍大时, 容易发散或者收敛到错误结果.

本文采用文献[1]提出的多项式模型, 增加图像亮度为 0 映射到实际场景亮度也为 0 的限制条件, 使算法稳健性大大提高. 本文用图像像素平均值的比作为初始的曝光度比, 省去了输入曝光度比估计值的麻烦, 并都能收敛到正确的结果. 最后, 本文还改进了文献[1]中的迭代结束条件, 使求得的响应函数和精确曝光度比是最优解.

标定相机响应函数过程中的每一次迭代, 主要

是求解方程组(9)得到多项式的系数和计算式(10)更新曝光度比. 使用图像中所有的像素来计算, 速度将会很慢; 选择的像素个数太少将导致结果误差比较大; 我们的实验表明, 选择几百到几千个像素来计算, 获得的结果和运算时间都是可接受的.

本文的结果在基于图像的建模和绘制、图像拼接等领域都可获得应用. 基于图像的建模和绘制中很多算法都假设图像的像素值和实际场景亮度成线性关系^[1], 利用本文得到的响应函数对图像作一个变换, 即可满足线性关系的要求. 在全景图的拼接中, 由于各个方向亮度不一样, 拍摄时相机的曝光度设置也会不一样, 这样拍的图像如果直接进行拼接, 会存在拼接出来的图像中亮度不一致的问题. 利用响应函数将图像都映射到实际场景亮度, 根据重叠部分计算出曝光度比, 然后将所有图像都线性缩放到同一曝光度, 这样拼接出来的全景图亮度就可达到一致^[10].

参 考 文 献

- 1 Mitsunaga T., Nayar S. K.. Radiometric self calibration. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, 1999, 374~380
- 2 Devlin K.. A review of tone reproduction techniques. Depart-

- ment of Computer Science, University of Bristol, Bristol: Technical Report CSTR-02-005, 2002
- 3 Larson G. W., Shakespeare R.. Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998
- 4 Mann S., Picard R.. Being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures. In: Proceedings of IST's 48th Annual Conference, Washington, 1995, 422~428
- 5 Debevec P. E., Malik J.. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH97, Los Angeles, 1997, 369~378
- 6 Aggarwal M., Ahuja N.. Split aperture imaging for high dynamic range. In: Proceedings of IEEE ICCV, Vancouver, Canada, 2001, II: 10~17
- 7 Nayar S. K., Mitsunaga T.. High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures. In: Proceedings of IEEE CVPR, Hilton Head Island, South Carolina, 2000, 472~479
- 8 Fattal R., Lischinski D., Werman M.. Gradient domain high dynamic range compression. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH2002, San Antonio, Texas, USA, 2002, 249~256
- 9 Drago F., Myszkowski K., Annen T., Chiba N.. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. In: Proceedings of the EUROGRAPHICS2003, Granada, Spain, 2003, 22(3): 419~426
- 10 Zhang W. X., Zhou B. F.. An HDR brightness correction algorithm for panorama images. In: Proceedings of the 4th IASTED VIIP, Marbella, Spain, 2004, 608~612



ZHANG Wei-Xiang, born in 1979, M. S., practice researcher. His interests are focused on digital image processing including wavelet based image and video compression, high dynamic range image and its applications, interactive image segmentation, etc.

ZHOU Bing-Feng, born in 1963, Ph. D., researcher, Ph. D. supervisor. His research interests include graphics simulation of robot kinematics, geometry models and CAD/CAM, color image processing, multimedia system and image special effects, digital image halftone, image based rendering and modeling, virtual reality, etc.

Background

This work is a part of the first author's thesis for his MS degree. His thesis is about HDR image and its applications. It solved the problems that how to create HDR images and how to display HDR images on traditional low dynamic range displaying devices. With HDR image technologies, they re-

moved the artifact of the brightness incoherency when two differently-exposed images were blended in panorama. This paper describes the algorithms which calibrate the camera response function and create the HDR image.