

doi:10.3788/gzxb20134206.0737

高动态范围图像合成中相机响应函数的快速标定

方华猛, 易本顺, 甘良才, 文闯, 黄太奇

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要:针对高动态范围图像合成过程中相机响应函数标定速度低的问题,提出了一种快速有效的相机响应函数标定的方法.首先根据不同曝光度的图像在成像过程中场景照度保持一致的特性,提出构建一种新的最小平方代价函数,以降低相机响应函数标定方程组的维数;然后在保证标定方程组求解效率的前提下,根据不同曝光度图像的噪音分布,引入高斯加权函数,有效减小多曝光图像在高亮或过暗区域成像过程中引入的噪音,并利用稳健的 QR 分解算法提高标定方程组的求解速度;最后采用查表的方法,利用高斯加权函数完成场景照度的合成及相应的色调映射,得到能表现整个场景亮区和暗区细节的可视化图像.实验结果表明,与传统方法相比,本文算法在保证相机响应函数标定准确度的同时,具有计算量小、速度快的优点,可实现相机响应函数的快速标定,而且所获得的可视化图像主观效果有所提高,在便携式摄像设备上具有广泛的应用前景.

关键词:快速标定;高斯加权;相机响应函数;高动态范围图像

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)06-0737-5

A Fast Calibration Method of Camera Response Function for High Dynamic Range Image

FANG Hua-meng, YI Ben-shun, GAN Liang-cai, WEN Chuang, HUANG Tai-qi

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A fast and effective method is presented to solve the problem of inefficiency in calibration algorithm for camera response function in synthesis of high dynamic range image. Firstly, according to the fact that the corresponding illuminances on scenes in imaging process among multi-exposure images are accordant, a new least-squares error function is proposed to reduce the dimensions of calibration equation. Gaussian weight function is used in accordance with noise distribution of images in different exposures to eliminate ambient noise in image process in excessive dark and light area with high efficiency to solve equations. Meanwhile, robust QR decomposition is put forward to accelerate the calculation of camera response function. At last, the look-up table method is adopted and Gaussian weight function is used to synthesize the illuminances on scenes and tone mapping; the result image can be well expressed to obtained the detail information of dark and light area in entire scene. The sufficient experimental results on various scenes indicate that this method has smaller computational amount, higher speed than traditional method and has good precision as well. The proposed method can be used to accomplish rapid calibration of camera response function while subjective effect is good in the visualization image obtained by this method. And this method can be applied widely in portable camera equipments.

Key words: Fast calibration; Gaussian weight; Camera response function; High dynamic range image

第一作者:方华猛(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为图像视频处理技术. Email:f350780235@whu.edu.cn

导师(通讯作者):易本顺(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为多媒体信息处理及无线通信技术. Email:yibs@whu.edu.cn

收稿日期:2012-12-28;录用日期:2013-04-01

0 引言

高动态范围图像(High Dynamic Range Image, HDRI)可以在一张图像中较为全面地表现整个场景的细节^[1-4],在智能手机、便携式相机、影视特技、机器视觉等领域有较为广泛的应用前景,其软件合成方法中的关键技术之一就是相机成像系统的光照响应函数(即相机响应函数)的标定.相机响应函数的标定速度和精确度直接影响了 HDRI 的合成快慢和可视化效果^[5].

近些年来,随着高动态范围图像技术的发展,相机响应函数的标定已吸引了研究人员的广泛关注.传统的标定算法是利用场景照度和多曝光图像像素之间的关系,并结合亮区和暗区像素受噪音的干扰情况不同而引入加权函数,构建多曝光图像多个像素点对应的方程组,然后利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)算法得到方程组的最优解,从而完成相机响应函数的标定^[6].部分学者提出用 N 次多项式来模拟相机响应函数,使用不同图像曝光度比的估计值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,就可得到响应函数和精确的曝光度比^[7].Goossens B. 等学者提出在标定响应函数时,利用最大信噪比准则构建加权函数提高抑制噪音的能力^[8],继而又通过建立服从泊松分布的噪音模型来消除普通数码相机的传感器噪音^[9].在求解线性方程组方面,Joon-Young L. 等学者提出将相机响应函数标定问题等效为一个求解矩阵最小秩的问题^[10],即利用得到的多曝光图像行列像素构成矩阵,然后采用最优化方法得到多项式形式的相机响应函数.

本文利用多曝光图像之间的关系,构造新的线性方程组以避免不必要的参量求解,利用 QR 分解取代 SVD 分解算法求解相机响应函数标定方程,提高相机响应函数的标定速度,同时引入查表式的高斯加权函数,减小相机成像过程中引入的图像噪音,得到主观效果较好的可视化图像.

1 传统的相机响应函数标定

相机在拍摄时,场景光线进入镜头后经过感光、数字化及后续的运算转换等处理,转换为数字图像,因此相机成像的过程实际上是场景照度到最终图像的一种映射,通常称这种映射关系为相机的响应函数,其数学模型为

$$z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (1)$$

式中, z_{ij} 为第 j 张图片的第 i 个像素灰度值; E_i 为

场景中第 i 个点的照度; Δt_j 为第 j 张照片的曝光时间, $f(\cdot)$ 表征经过模数转换等一系列非线性变化的过程,是一个非线性单调函数^[11-13].

由于 $f(\cdot)$ 是单调映射函数,因此存在反函数 $g(\cdot) = \ln f^{-1}(\cdot)$,将其代入式(1),并对两端同时求对数,得到

$$g(z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2)$$

一般也将 $g(\cdot)$ 称为相机响应函数^[14-15].利用低动态范围图像完成响应函数 $g(\cdot)$ 的求取,进而得到整个原始场景的照度图.

现有的成熟 HDR 合成软件在相机响应函数的标定过程中普遍采用 Debevec 等人提出的标定算法(以下简称“D 算法”),即根据方程(2),利用最小平方误差估计来完成 $g(\cdot)$ 的求取.首先构造最小平方代价函数,然后对响应函数 $g(\cdot)$ 和照度 E 分别求偏导,令偏导值为零,然后将足够多的抽样像素点代入,联合构造超定线性方程组.最后利用奇异值分解算法求解 256 阶灰度值相应的相机响应函数值和样本点对应的照度值,完成相机响应函数的标定.

传统 D 算法稳健性好,准确度高,标定的相机响应函数单调平滑,符合一般相机成像特点.但是构建最小代价方程时,引入了不必要的样本点照度,额外增加了线性方程组的规模,另外其较为保守的 SVD 算法较大地限制了结果的求取速度,最终导致该算法速度受限.

2 快速的相机响应函数标定方法

本文依据相机对同一场景进行短时间的多次不同曝光拍摄时,多曝光图片之间存在照度一致等关系这一事实,提出了一种利用这种关系改进最小平方代价函数构建方法,去掉不必要的采样点场景照度,并通过快速的 QR 分解来完成超定方程组的求解,以提高相机响应函数的标定速度,同时引入有效的加权函数,有效降低多曝光图像引入的噪音,进一步提高相机响应函数的标定准确度.

2.1 相机响应函数标定方程组的构建

传统 D 算法在构建相机响应函数标定方程组时,引入了无后续作用的抽样点照度值,额外增加了方程组的未知数,增加了计算复杂度,造成了计算存储资源浪费,解方程组效率低等问题.

针对以上问题,本文利用不同曝光量图片的同一场景原始照度相同的特性^[7-8],重新构造只含有单一自变量的线性方程组,并对线性方程组的系数矩阵进行降维,具体构建原理如图 1 所示.图 1 中引入的加权函数是为了有效减小多曝光图像在明亮或过暗区域成像过程中引入的噪音,三角形函数因其运

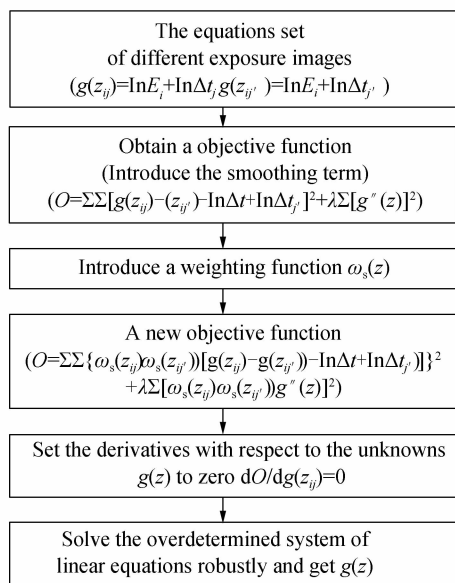


图1 改进的响应曲线标定方法

Fig. 1 Improved calibration method of response curve
算量小,速率较高,因此传统 D 算法选择三角形函数作为加权函数,函数具体形式为

$$\omega(z) = \begin{cases} \frac{(z - z_{\min})}{(z_{\max} + z_{\min})/2}, & z \leq (z_{\max} + z_{\min})/2 \\ \frac{z_{\max} - z}{(z_{\max} + z_{\min})/2}, & z > (z_{\max} + z_{\min})/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, z 为像素值; z_{\min} 和 z_{\max} 分别为最小和最大像素值,分别取 0 和 255.

简单的三角形加权函数虽然能够节省处理时间,但是当处理高亮或过暗区域时,由于在像素区域两端的权重过小,噪点抑制效果不明显,另一方面考虑到一般的图像噪音呈高斯分布,因此本文采用高斯加权函数代替三角加权函数,同时适当提高两端像素点的权重,有效地减小噪音干扰,加权函数为

$$\omega(z) = \exp\left(-k \times \frac{(z - z_{\text{mid}})^2}{z_{\text{mid}}^2}\right) \quad (4)$$

式中: z_{mid} 取低动态范围图像像素的中间值(一般取 128); k 依据低动态范围图像的个数取值.

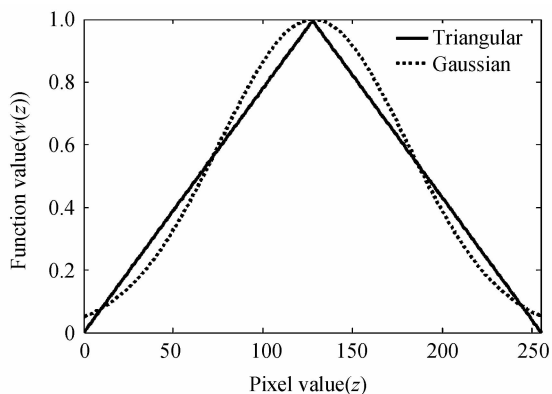


图2 不同加权函数的曲线图

Fig. 2 The graph of different weighting functions

在实际应用中,由于 z 取 0 到 255 之间的 256 个整数,响应的加权函数 $\omega(z)$ 为 256 个有限数值,因此加权函数可采用查表的方式,在保证效果的同时,避免了运算量的增加.

2.2 相机响应函数标定方程组的求解

在求解相机响应函数标定方程组时,本文运用更加快速的 QR 分解取代 SVD 分解来求解线性方程组.

由于多曝光图像的所有相同位置取样点像素不可能完全相同,因此在构造系数矩阵时,列向量之间不存在线性关系,即系数矩阵列满秩,此时利用奇异值分解和 QR 分解都是求取超定方程组的最小二乘解,其结果唯一.另外使用 QR 分解或 SVD 分解求解最小二乘问题时,由于采用的是正交变换,它们都是数值稳定的.当方程组系数矩阵为 m 行 n 列($m > n$)时,利用 SVD 分解算法求解方程组运算复杂度为 $2n^2(m-n/3)$,而 QR 分解算法求解的算法复杂度为 $n^2(m-n/3)$,仅为 SVD 分解算法的一半.因此,利用 QR 分解取代 SVD 分解,可以在保证结果准确的前提下,减少分解矩阵运算所占的存储空间,可以有效加快方程组的求取速度.

3 实验结果及分析

为了评价本文相机响应函数标定算法的性能,用传统 D 算法和本文算法针对同一相机响应函数标定的结果、多个相机响应函数标定的效率以及简单对数映射后的效果等三个方面分别进行测试对比.实验硬件平台为 Intel I5-2500K 处理器(主频 3.3 GHz),内存为 3.40 GB,软件开发环境为 VS2005.

3.1 同一相机响应函数标定结果对比

图 3 是用 Canon EOS 20D 数码相机拍摄同一场景后得到的 3 幅低动态范围图像,快门时间依次是 1/4 000 s, 1/250 s, 1/30 s.

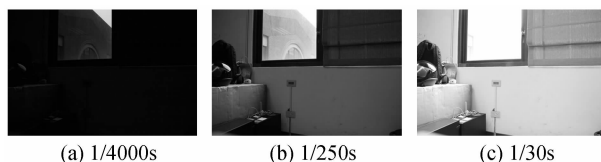


图3 三张不同快门时间的数码照片

Fig. 3 Three digital images in different shutter speeds

分别利用经典的 D 算法模型和改进的响应模型对 RGB 中的 R 通道构造线性方程组,方程组的系数矩阵维数如表 1 所示.

图 4 为本文算法和 D 算法在 R 通道上标定的相机响应函数结果.由图 4 中右下局部放大图可知,

表 1 相机响应函数标定方程数量对比

Table 1 The Contrast among number of calibration functions for camera response function

Method	The dimension of the coefficient matrix	The dimension in the experiment
D method	$(256 + \text{frame} \times N) \times (256 + N)$	$1\ 036 \times 516$
Improved method	$(\text{frame} \times N) \times (256)$	960×256

注:表中 frame 为多曝光图像张数, N 为每张图像上采样的点数, 实验中 frame 取为 3, N 取 320.

本文算法得到的相机响应曲线与 D 算法的结果仅存在 5% 左右的误差, 并且两者的曲线形状、平滑度、端点值等几乎一致, 从而可有效保证若经同等后

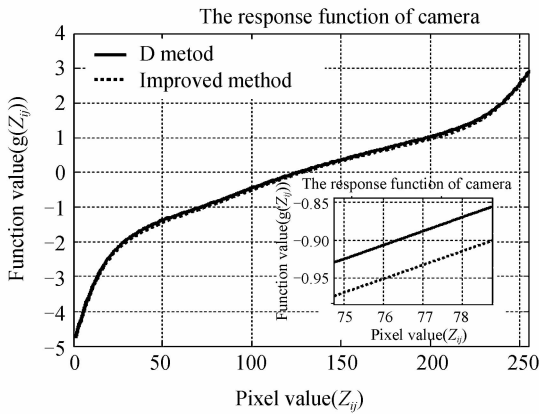


图 4 相机响应函数标定结果

Fig. 4 The result of calibration functions for camera response

续处理后, 合成的高动态图像在对比度和动态范围等方面达到与 D 算法几乎相同的效果^[5].

3.2 多种相机的响应函数标定的效率

对各种不同类型相机拍摄的不同场景多曝光图像, 分别利用本文算法和传统 D 算法来标定不同相机的响应函数, 其标定时间如表 2 所示.

表 2 改进前后 HDR 合成及映射处理时间对比

Table 2 The contrast between conventional HDR and modified HDR synthesis and mapping in processing time

Multi-exposure images	Resolution	D method/s	Improved method/s
Memorial	512×768	3.047	0.234
Seaandtower	$685 \times 1\ 024$	3.063	0.234
Pic1	$1\ 000 \times 1\ 500$	3.063	0.188
1 080 p	$1\ 920 \times 1\ 080$	3.047	0.250
IMG1	$2\ 592 \times 1\ 728$	3.047	0.250
Samplecarnival	$2\ 048 \times 3\ 072$	3.070	0.250

注: 实现相机响应函数标定过程中, 采样点个数均为 320 个.

3.3 色调映射后的图像效果

本文算法在进行合成照度及色调映射等处理时利用了多曝光图像之间的关联性, 并结合高斯加权函数, 使得处理后的图像主观效果较 D 算法有所改进. 由于本文算法主要用于对普通便携式摄像设备获得的图像进行后处理, 从而提高图像的主观效果, 因此选取普通便携式摄像设备拍摄得到的低动态范围图像作为实验对象. 图 5 为三个不同场景分别在不同曝光量设置下得到的低动态范围图像, 以及经

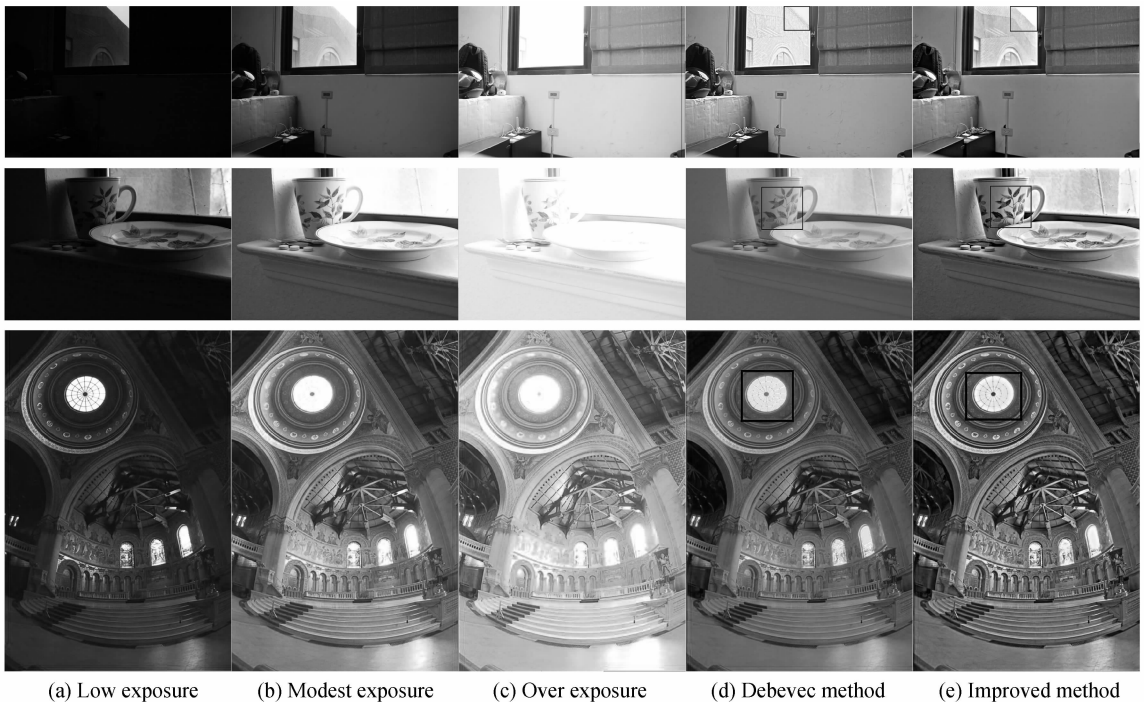


图 5 不同算法合成并映射后的结果

Fig. 5 Results of synthesis and mapping of different methods

过本文算法和 D 算法完成响应函数标定后,分别按照高斯加权函数和三角加权函数完成高动态范围图像合成及对数色调映射后的效果图。

第一个场景中窗户内右上端屋脊交界部分(第一组图(d)、(e)中小方框区域所示)可以看出,利用本文算法处理后的图像比 D 算法处理后的噪点少,边界更加明显;第二个场景中本文算法处理后的瓷杯花纹等细节信息更加明显(第二组图(d)、(e)中小方框区域所示),图像的对比度高,能有效在一幅图像中同时展现场景的高亮区域和暗区域细节;第三个场景的穹顶窗户部分(第三组图(d)、(e)中小方框区域所示),D 算法处理后出现窗口轮廓模糊,这是因为三角加权对饱和点的权值分配过小,导致在原图中的饱和点合成的像素偏低,对比度下降。而本文算法结合图像噪音的分布情况,利用高斯加权函数替代 D 算法的三角加权,一方面有效抑制图像噪音,使图像整体清晰度更高,另一方面,在明暗过渡区域(如穹顶窗户边缘区域),有效通过控制对饱和点和暗点区域的权重,避免明暗区域出现模糊现象,损失图像边缘细节。从图 5 中可以看出,本文算法利用同一场景中多曝光图像之间的关联性,并结合高斯加权函数,可以有效地消除场景中的图像噪音,提高图像的对比度。

4 结论

通过理论分析和实验结果表明,利用多曝光图像之间的关系构建相机响应函数方程组,并采用快速的 QR 分解算法来求解,在保证相机响应函数准确度的前提下,可以有效加速相机响应函数的标定,同时采用高斯加权函数可以有效减小图像噪音,克服传统 D 算法中三角形加权函数对高亮区和暗区处理的不足。本文方法可以使高动态范围图像合成的效果得到改善,并且速度加快,在便携式摄像设备上具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] CHEN Zhe-bo, XU Jin, NI Xu-xiang, *et al.* A method of HDR image acquirement based on space light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 844-847.
陈浙泊,徐进,倪旭翔,等.基于空间光调制器的 HDR 图像获取方法[J].*光子学报*, 2008, **37**(4): 844-847.
- [2] MA Jun, NI Xu-xiang. Image quality analysis of high dynamic range imaging system based on mutual information[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1825-1829.
马俊,倪旭翔.基于互信息的高动态范围成像系统成像质量分析[J].*光子学报*, 2010, **39**(10): 1825-1829.
- [3] PARK T J, PARK I K. High dynamic range image acquisition using multiple images with different apertures[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(12): 127002.1-127002.7.
- [4] SEN P, KALANTARI N K, YAESOUBI M, *et al.* Robust patch-based HDR reconstruction of dynamic scenes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, **31**(6): 203.01-203.11.
- [5] JINNO T, OKUDA M. Multiple exposure fusion for high dynamic range image acquisition[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(1): 358-365.
- [6] HUA Shun-gang, WANG Li-dan, OU Zong-ying. Constructing high dynamic range image based on photographs with different amounts of exposure[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, **47**(5): 678-682.
华顺刚,王丽丹,欧宗瑛.基于多幅不同曝光量照片的场景高动态范围图像合成[J].*大连理工大学学报*, 2007, **47**(5): 678-682.
- [7] ZHANG Wei-xiang, ZHOU Bing-feng. A robust HDR image calibration algorithm for camera response function[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2006, **29**(4): 658-663.
章卫祥,周秉锋.一个稳健的用于 HDR 图像的相机响应函数标定算法[J].*计算机学报*, 2006, **29**(4): 658-663.
- [8] NEVE S D, GOOSENS B, LUONG H, *et al.* An improved HDR image synthesis algorithm [C]. The International Conference on Image Processing (ICIP). Cairo: IEEE, 2009: 1545-1548.
- [9] GOOSSENS B, LUONG H, AELTERMAN J, *et al.* Reconstruction of high dynamic range images with Poisson noise modeling and integrated denoising[C]. The International Conference on Image Processing (ICIP). Brussels: IEEE, 2011: 3429-3432.
- [10] JOON-young L, BOXIN S, MATSUSHITA Y, *et al.* Radiometric calibration by transform invariant low-rank structure [C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Colorado Springs: IEEE, 2011: 2337-2344.
- [11] YU-feng Hsu, SHIH-fu Chang. Camera response functions for image forensics: an automatic algorithm for splicing detection[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, **5**(4): 816-825.
- [12] SUNYEONG K, YU-Wing T, SEON-Joo K, *et al.* Nonlinear camera response functions and image deblurring [C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Colorado Springs: IEEE, 2012: 25-32.
- [13] SRIKANTHA A, SIDIBE D. Ghost detection and removal for high dynamic range images: Recent advances[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2012, **27**(6): 650-662.
- [14] MONGKULMANN W, OKABE T, SATO Y. Photometric stereo with auto-radiometric calibration [C]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), Catalonia: IEEE, 2011: 753-758.
- [15] EASTWOOD B S, CHILDS E C. Image alignment for multiple camera high dynamic range microscopy [C]. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), Colorado: IEEE, 2012: 225-232.