

文章编号 1004-924X(2016)06-1510-10

## 克服动态问题影响的相机响应函数标定

都琳\*, 孙华燕, 张廷华, 王帅  
(装备学院, 北京 怀柔 101416)

**摘要:**利用图像之间的亮度映射函数而不是图像本身各像素点信息进行相机响应函数的标定,避免了成像系统的晃动或者拍摄场景的动态问题带来的图像配准之间的误差给后续标定算法带来的影响。采用直方图规则化的方法分析不同曝光量图像之间的各颜色通道不同亮度级的统计特征,获得了不同图像对之间的亮度映射函数。然后,利用图像对之间的亮度映射函数结合各帧图像的直方图建立求解相机响应函数的超定方程模型。最后,利用最小二乘法解算模型获得相机响应函数。验证实验表明,本文相机响应函数标定算法具有克服相机的动态问题的能力;不同输入帧数图像的分组实验显示,最小输入4帧图像能够获得较为理想的响应函数标定结果。

**关键词:**亮度映射函数;相机响应函数;直方图建模;动态场景

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1510

## On calibration of camera response function free from the impact of dynamic problem

DU Lin\*, SUN Hua-yan, ZHANG Ting-hua, WANG Shuai

(The Academy of Equipment, Huairou, Beijing, 101416, China)

\* Corresponding author, E-mail: daiqisundu@163.com

**Abstract:** Calibration of camera response function was carried out by means of brightness mapping between images rather than pixel information of the images themselves, which could help avoid the impact of image registration errors caused by image system shaking or dynamic problem in the shooting site on the follow-up calibration algorithm. The method of histogram regularization was adopted to analyze the statistical characteristics of different color channels with different light levels between images of different exposures, and the brightness mapping function between different image pairs were obtained. Then, the over-determined equation model was worked out by combining the brightness mapping function between different image pairs with the histogram of each frame image. For the last step, the camera response function was obtained by means of the least square method. It shows that the calibration algorithm for camera response function can help overcome the impact of dynamic problem, and the grouping experiment on images with different input frames indicates that the fewest images with 4 input frames can achieve the optimal camera response function calibration value.

收稿日期:2016-02-13;修订日期:2016-04-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61302183)

**Key words:** brightness mapping function; camera response function; histogram modeling; dynamic scene

## 1 引言

成像系统通常是利用量化后的有限动态范围的亮度信息图像记录拍摄场景的,但更加精确地记录动态范围较宽的拍摄场景如同时包含光源以及目标的影子等情况时,则需要获得图像中每个像素点对应的辐亮度信息,即反映真实场景的高动态范围图像。高动态范围成像技术具有重要的研究价值,许多计算机视觉应用算法都需要精确测量拍摄场景高动态范围的辐亮度信息。利用成像系统的相机响应函数(Camera Response Function, CRF)能够在拍摄图像强度信息与场景辐亮度之间建立严格的映射关系<sup>[1-2]</sup>,因此相机响应函数标定是高动态范围图像融合的关键技术。

现有的很多相机响应函数标定算法都利用多曝光量序列图像中的每个像素点信息求取该函数,计算效率低耗时长,并且需要假设多幅图像照度一致且精确配准,这在实际中是很难做到的。目前现有的相机响应函数标定算法主要是以不同曝光量的已配准图像序列作为输入,并已知图像之间的曝光比例。Mann<sup>[3]</sup>以牺牲空间分辨率为代价通过具有空间变化透过率的图像滤波器获得变化曝光量;Mitsunaga和Nayar<sup>[4]</sup>利用多项式近似描述相机响应曲线,该方法明显的优势在于能够在获得相机响应方程的同时准确地求解曝光比例;Debevec<sup>[5]</sup>利用图像中各像素点的亮度信息建立最小二乘超定方程进行相机响应函数标定,该方法计算效率低耗时长;Grossberg和Nayar<sup>[6]</sup>提出通过对相机响应函数集进行主成分分析(PCA)获得相机响应函数模型。该方法避免了直方图分析方法需对不同曝光图像进行空间对齐的问题,但以上这些相机响应函数标定算法均无法克服动态问题带来的困难,所以需要研究能够克服运动问题的相机响应函数标定算法。

考虑到固定曝光量的条件下,亮度映射函数是相机在的固有特征,与拍摄场景无关,基于亮度映射函数的方法不仅能够标定静态场景序列图像

的响应函数,也能够对动态场景的成像系统响应函数进行标定。本文提出一种克服动态问题的相机响应函数标定算法。只要拍摄场景的辐亮度基本保持恒定,即使采集的图像中对应的像素点有所移动,仍能够利用本文提出的算法进行相机响应函数标定,从而扩展了相机响应函数标定的应用范围。

## 2 基本原理

相机响应函数是成像系统如相机在实际成像过程中所受到的各种线性与非线性关系的总和,用于表示采集图像强度信息与真实场景辐亮度之间的映射关系。该函数模拟了图像获取处理过程中的非线性影响,如非线性动态范围的压缩与量化。CRF具有固定不变性、非线性性、光滑连续性以及单调递增的性质。

假设  $f$  表示 CRF,利用  $f$  表示场景辐照度值  $I$  对应采集图像上强度值  $M$  的关系如式(1)所示:

$$M = f(I) \quad (1)$$

由于 CRF 具有单调性,所以存在反函数  $g = f^{-1}$ ,即  $I = f^{-1}(M) = g(M)$ 。故针对同一场景拍摄的两帧不同曝光量图像对应辐照度之间的映射关系如式(2)所示:

$$g(m_B) = k g(m_A) \quad (2)$$

式中  $m_A$  是图像 A 上被估计的图像强度,  $m_B$  是图像 B 上对应点的强度,  $k$  是图像 A 和图像 B 之间的曝光比。

在光照不变的条件下,对于拍摄场景中的某一点,比其亮与比其暗的像素点的个数比例是恒定的,基本不受成像系统晃动的影响,因此可利用图像各颜色通道像素点的亮度统计信息进行相机响应函数的标定。由于直方图能够较好地反映彩色图像各颜色通道像素点亮度的统计信息,所以本文采用直方图规则化方法分析不同曝光量图像之间各颜色通道在不同亮度级的统计特征,以获得由具有不同曝光量的两帧输入图像组成的图像

对之间的亮度映射函数,再利用多个亮度映射函数建立相机响应逆函数模型的超定方程,最后结合最小二乘法求解相机响应函数的表达式。算法流程图示意图如图 1 所示。

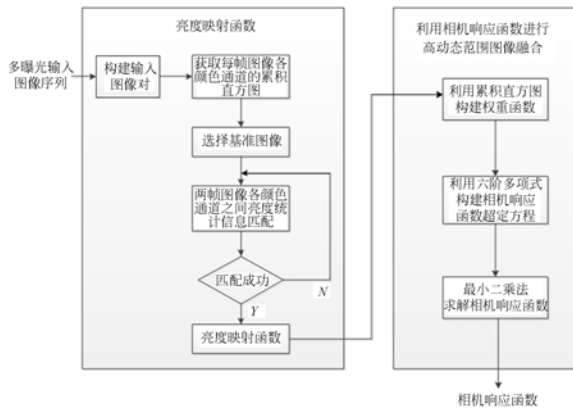


图 1 基于亮度映射函数的相机响应函数标定算法流程  
Fig. 1 Flowchart of CRF calibration algorithm based on brightness mapping function

## 2.1 亮度映射函数

亮度映射函数  $T$  阐述了以不同曝光量采集的图像中,同一场景的亮度值是如何从一帧图像传递到另一帧图像的<sup>[8]</sup>。同一场景拍摄的不同曝光量图像中对应的两个测试点的亮度值,包含了能够恢复成像系统相机响应函数的信息。假设  $(M_A, M_B)$  是两幅图像中对应的亮度值,  $J(M_A, M_B)$  是图像 A 中亮度为  $M_A$  的数值以及相应图像 B 中亮度为  $M_B$  的数值,结合公式(2),将两帧图像的亮度映射函数  $T$  定义如下:

$$M_B = T(M_A) = g^{-1}(kg(M_A)). \quad (3)$$

则式(2)可表述如下:

$$g(T(M)) = kg(M). \quad (4)$$

相较于公式(2),公式(4)的优势在于亮度映射函数包含了图像之间相应亮度值的所有信息,从而可以通过式(4)解的存在性与唯一性,进而利用亮度映射函数恢复相机响应逆函数  $g$ 。

## 2.2 相机响应逆函数的分形自相似性

分形是局部以某种方式与整体相似的形体,这一定义突出了分形自相似性的特征,即局部之间、局部与整体之间在形态、空间、功能等方面具

有统计意义上的自相似性。实际应用中,分形可以是几何图形,也可以是一种具有功能和信息结构的数理模型。

公式(4)中等式左边  $g$  在区间  $(T^{-1}(1), 1]$  的取值等价于等式右边  $g$  在区间  $(T^{-2}(1), T^{-1}(1)]$  的取值,当  $g(1)=1$ ,则  $g(T^{-1}(1))=1/k$ ,即公式(4)中的相机响应反函数  $g$  通过亮度传递函数  $T$  扩展了  $k$  倍。由于相机响应逆函数  $g$  是光滑连续且单调递增的,则  $g$  在  $(T^{-1}(1), 1)$  上的任意值仍然是公式(4)的解,即相机响应反函数具有分形自相似性。

分形自相似性的存在会影响相机响应函数的标定结果,所以后续的过程需要结合各颜色通道相应亮度值的统计特征以解算相机响应反函数,并加入相应的权重克服分形自相似性给相机响应逆函数标定带来的困难,从而避免解的不唯一性。

## 2.3 基于直方图规则化获得亮度映射函数

事实上,对同一目标以不同角度采集的图像基本具有一致的场景辐亮度分布,场景运动不会明显改变场景辐亮度的直方图<sup>[9]</sup>。只要场景的辐亮度基本一致,就能够通过分析两幅输入图像对的亮度统计特征即直方图获得图像亮度映射函数。

目前已有的计算成像系统响应函数的算法都需要输入不同曝光量精确配准的图像,但在实际情况中很难达到精确配准。然而由于亮度映射函数是相机及相应曝光量所具有的固有特征,而不依赖于拍摄场景,故可以通过分析图像亮度信息的统计特征即直方图的变化获得图像之间的亮度映射函数,从而对相机响应函数进行标定。一定的目标以及场景运动下,场景辐亮度的总体直方图基本保持恒定,可利用不同曝光图像构建输入图像对,通过对输入图像对直方图规则化获得两帧不同曝光量图像之间的亮度映射函数。如果输入的图像直方图有空缺,则无法提供足够的信息以获得亮度映射函数,比如当图像全部饱和的情况。

假设输入图像的直方图  $h(u)$  没有空缺部分,定义图像的累积直方图  $H(B)$  如公式(5)所示:

$$H(B) = \int_0^B h(u) du, \quad (5)$$

式中  $h(u)$  是图像的直方图,  $B$  是图像的任意彩色通道的亮度值。

假设输入的两帧图像是在相机没有大幅度晃动的条件下获得的, 利用亮度映射函数建立输入图像对中的第二帧图像亮度值  $B_2$  与第一帧图像中的亮度值  $B_1$  的对应关系, 即  $B_2 = T(B_1)$ 。由于它们对应于拍摄场景中的同一点, 则第一帧图像中亮度值小于  $B_1$  的数目应与第二帧图像中亮度值小于  $B_2$  的数目相等, 即  $H_1(B_1) = H_2(B_2) = H_2(T(B_1))$ 。令  $B_1 = u$ , 则亮度映射函数  $T$  定义如下所示:

$$T(u) = H_2^{-1}(H_1(u)), \quad (6)$$

该理论可通过直方图规则化进行阐述。直方图规则化是通过重置亮度值来改变图像直方图的, 即利用不同亮度值信息对应的图像像素值个数获得相应亮度值的累积直方图, 通过对同一拍摄场景不同曝光量的两帧图像的累积直方图进行直方图规则化, 可将两帧存在动态问题影响的输入图像的累积直方图校正一致, 从而获得两帧图像之间的亮度映射函数。

#### 2.4 基于亮度映射函数获得相机响应函数

利用 2.3 节中获得的多组不同曝光量图像之间的亮度映射函数, 结合公式(4)进行相机响应函数的求解。该算法不仅克服了运动问题带来的图像配准的困难, 而且大大降低了计算复杂度, 提高了计算效率。

用于计算图像之间亮度传递函数的两帧图像的累积直方图  $H_A$  和  $H_B$  不是一致的, 这意味着任意一个颜色通道的亮度级对应的亮度传递函数依赖于图像中该灰度级对应的像素数目, 因此需要对约束方程加入相应权重以提高相机响应函数标定精度并克服相机响应函数的分形自相似性。对于映射对  $(M_A, T(M_A))$  而言,  $h_A(M_A) = C_1$  是第一帧图像中灰度级为  $M_A$  的像素个数,  $h_B(M_B) = h_B(T(M_A)) = C_2$  是第二帧图像中灰度级为  $M_B$  的像素个数。为了求解后续的最小二乘问

题, 将公式(4)乘以相应的约束得到:

$$g(T(M_A)) \sqrt{C_2} = k g(M_A) \sqrt{C_1}. \quad (7)$$

可以利用多项式函数对相机响应函数进行建模, 假设利用一个六阶多项式表示相机响应逆函数, 如式(8)所示:

$$g = m_1 x^6 + m_2 x^5 + m_3 x^4 + m_4 x^3 + m_5 x^2 + m_6 x + m_7. \quad (8)$$

将不同输入图像对获得的亮度传递函数带入公式(7)获得一组超定方程, 利用最小二乘法求解系数  $\{m_1, m_2, \dots, m_7\}$ , 从而获得相机响应逆函数的近似表达式  $g$ 。

该算法由于不需要对图像进行精确配准, 故能够很大程度地降低计算量。另外该算法是通过直方图规则化获得亮度映射函数进而进行相机响应函数标定, 并不需要拍摄场景严格静止, 也不需要成像系统没有晃动。

### 3 实验结果及分析

为验证本文提出相机响应函数标定算法的有效性, 采用同一型号的尼康 D90 相机采集静态场景以及加入动态条件的不同组的多曝光图像序列, 并在每组实验中采用不同的输入帧数, 以获得不影响响应逆函数标定的最少输入图像帧数。

#### 3.1 静态场景相机响应函数标定结果

在相同的光照条件下通过设置不同的曝光时间获得实验室场景的不同曝光量图像, 光圈值设为  $f/16$ , 为避免手动更改曝光量时造成的成像系统晃动, 利用快门线结合软件控制曝光量。选取曝光时间分别为  $1/10$ 、 $1/5$ 、 $1/2$ 、 $0.77$ 、 $2.5$ 、 $8$  和  $13s$  的 8 帧图像进行实验如图 2 所示。

选取图 2(a)和图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)、图 2(e)和图 2(f)、图 2(g)和图 2(h)组成 4 组图像对, 分别获得 3 个颜色通道不同输入图像对相应的亮度传递函数曲线, 如图 3 所示。

该组实验分别采用两帧输入图像、四帧输入图像以及八帧输入图像对算法进行实验验证。



图 2 D90 拍摄图像序列  
Fig. 2 Image sequences captured by D90

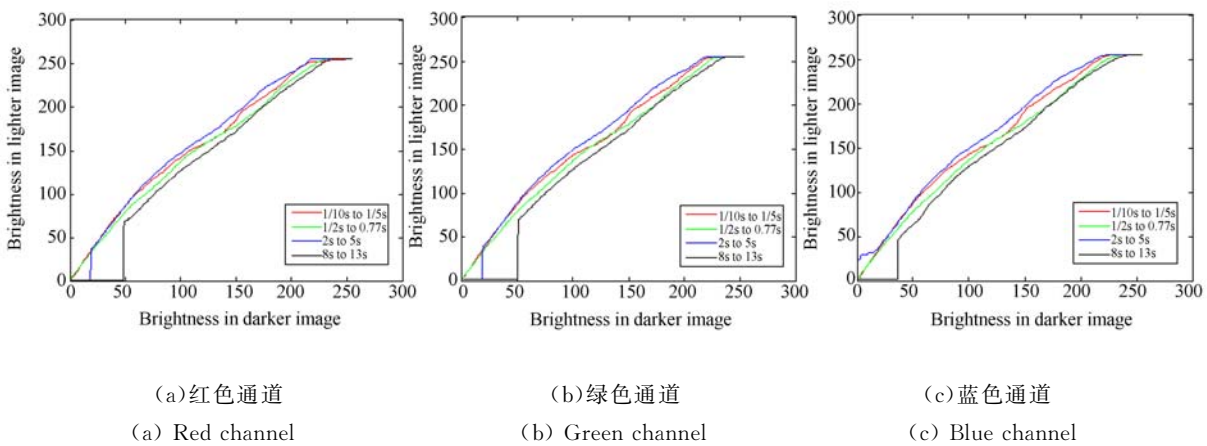


图 3 彩色输入图像不同色彩通道的亮度传递函数曲线  
Fig. 3 Brightness mapping function curves of different color channels

3.1.1 两帧输入图像相机响应函数标定结果

利用两帧图像作为输入图像进行相机响应函数标定,即利用各颜色通道中的一组输入图像对获得一个亮度映射函数,以进行相机响应函数的标定。选取图 2(a)和 2(b)获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(a)所示;选取图 2(c)和 2(d)获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(b)所示;选取图 2(b)和 2(c)获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(c)所示;选取图 2(c)和 2(e)获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(d)所示;选取图 2(d)和 2(e)

获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(e)所示;选取图 2(b)和 2(e)获得 3 个响应通道的响应函数如图 4(f)所示。

通过图 4 可以观察到,仅利用两帧图像获得的亮度传递函数进行相机响应函数标定,结果不稳定,不同的输入图像对之间的结果相差较大,标定的相机响应函数不满足其固有性特征。为了提高相机响应函数的标定精度,需要增加输入图像帧数以获得多个亮度传递函数进而进行相机响应逆函数的标定。

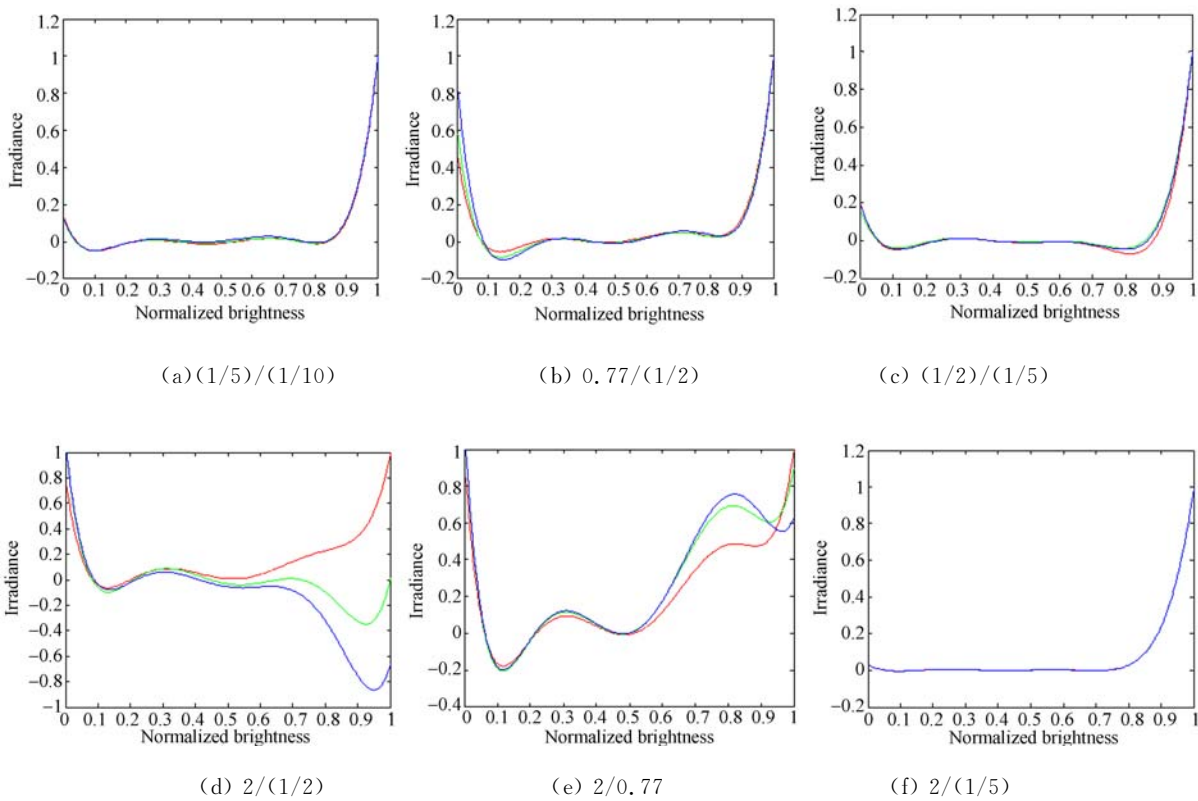
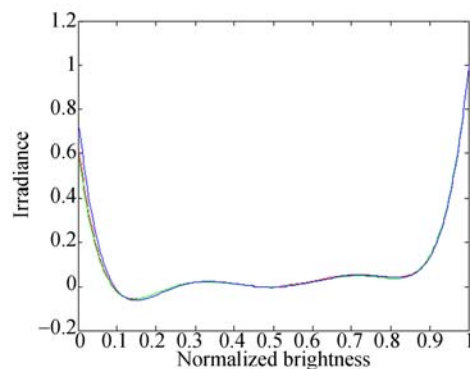


图 4 两帧输入图像相机响应逆函数标定结果

Fig. 4 Calibration results of inverse camera response function of two images

### 3.1.2 四帧输入图像相机响应函数标定结果

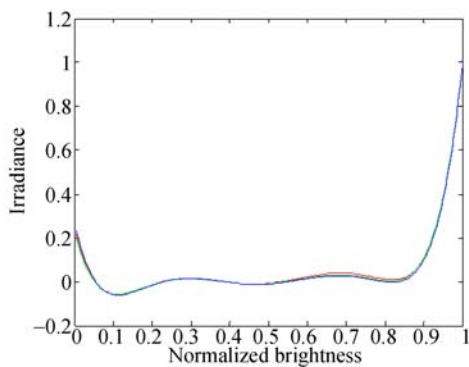
利用四帧图像作为输入图像进行相机响应逆函数标定,即利用各颜色通道中的两组输入图像获得两个亮度映射函数,进行相机响应逆函数的标定。选择图 2(a)和图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)获得两组亮度传递函数,将两组亮度传递函数对应的图像亮度信息带入公式(8),获得的相机响应逆函数如图 5(a)所示;选择图 2(c)和图 2(d)、图 2(e)和图 2(f)获得两组亮度传递函数,将它们



(b) 0.77/(1/2) & 5/2

图 5 四帧输入图像相机响应函数标定结果

Fig. 5 Calibration results of camera response function of four images



(a) (1/5)/(1/10) & 0.77/(1/2)

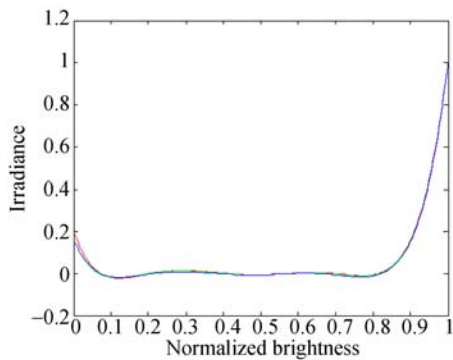
入公式(8)获得的相机响应逆函数如图 5(b)所示。

通过上述结果可以看出,当输入图像帧数为四帧时两组实验结果基本一致,符合相机响应函数的固有特征,所以四帧为能够获得较为理想的相机响应逆函数的最少输入图像数。

### 3.1.3 八帧输入图像相机响应函数标定结果

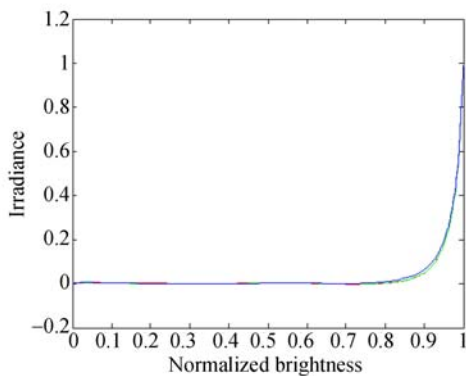
将图 2 中的八帧图像每两帧组成一组图像对

作为输入图像,分别选取图 3(a)和 3(b)、图 3(c)和 3(d)、图 3(e)和 3(f)、图 3(g)和 3(h)获得亮度传递函数,进而利用四组亮度传递函数获得 3 个颜色通道的相机响应逆函数如图 6(a)所示。为进一步验证本文提出算法的有效性,利用 Debevec 和 Malik[5]提出的利用多帧图像进行相机响应逆函数标定算法对图 2 的八帧图像进行相机响应标定,标定结果如图 6(b)所示。



(a)本文方法的标定结果

(a)Calibration results of proposed algorithm



(b)Debevec 和 Malik 方法的结果

(b)Calibration results of Debevec and Malik method

图 6 八帧输入图像相机响应逆函数标定结果

Fig. 6 Calibration results of camera response function of eight images

当利用两帧输入图像获得相机响应逆函数时,可通过 256 个方程构建的超定方程获得相机响应函数标定结果;当输入图像为四帧时,即构建两组输入图像对,则超定方程中方程数目增长为 512 个;当输入图像为八帧时,即构建四组输入图像对,超定方程中方程数目为 1 024 个。随着方程数目的增加,输入图像构建的图像对信息更加

丰富,从而利用最小二乘法获得标定的相机响应函数结果也更加理想。

通过图 6 中不同算法的对比分析可以看出,本文算法对静态图像的相机响应函数标定结果与 Debevec 和 Malik 提出算法的结果基本一致,但后者的单调性更加理想。

采用均方根误差对不同输入图像帧数获得的相机响应逆函数标定结果以及不同算法的相机响应函数标定结果进行定量评价,结果如表 1 所示。

表 1 不同方法对静态场景图像序列的均方根误差

Tab. 1 Root-mean-square errors of different algorithms on static state

	红色通道	绿色通道	蓝色通道
图 5(a)标定结果	0.653 9	0.711 0	0.609 5
图 5(b)标定结果	0.821 4	1.036 8	1.047 2
图 6(a)标定结果	0.425 3	0.406 2	0.418 7
图 6(b)标定结果	0.270 2	0.280 2	0.236 5

各颜色通道均方根误差越小表明标定精度越高。通过表 1 可以观察到针对静态场景图像序列进行相机响应函数标定,Debevec 和 Malik 算法的标定结果最为理想,本文标定算法的标定精度随着输入帧数的增加有所提升,当利用八帧输入图像进行标定时,能够获得较为理想的相机响应函数标定结果。

### 3.2 加入动态问题的相机响应函数标定结果

第二组实验通过设置不同的曝光时间以获得实验室场景不同曝光量的图像序列,光圈值设为  $f/16$ ,采用手动设置曝光量,以对成像系统加入晃动。在拍摄场景中人为加入手臂的晃动模拟拍摄场景中存在动态目标的影响。选取曝光时间分别为  $1/40$ 、 $1/15$ 、 $1/5$ 、 $1/2$ 、 $0.77$ 、 $1$ 、 $1.6$  和  $2$ s 的八帧图像进行实验如图 7 所示。

选取图 7(a)和图 7(b)、图 7(c)和图 7(d)、图 7(e)和图 7(f)、图 7(g)和图 7(h)组成 4 组图像对,分别获得 3 个颜色通道相应的亮度传递函数曲线如图 8 所示。

通过 3.1 节实验分析可知,至少需要输入四帧图像才能够获得高精度的相机响应逆函数的标定结果,所以该组实验分别采用四帧图像以及八帧图像作为输入。

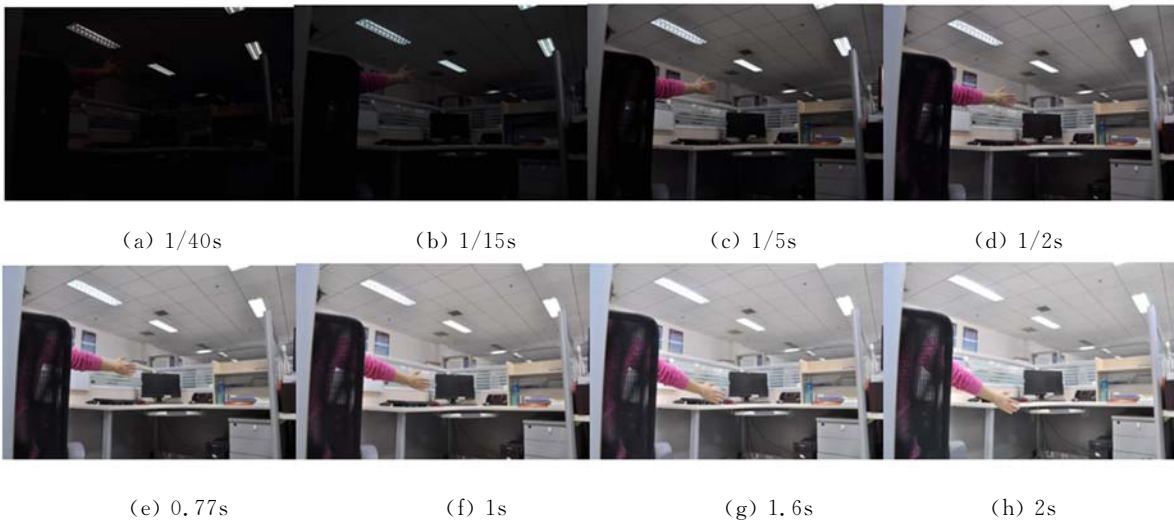


图 7 不同曝光量图像序列

Fig. 7 Image sequences with different exposure times

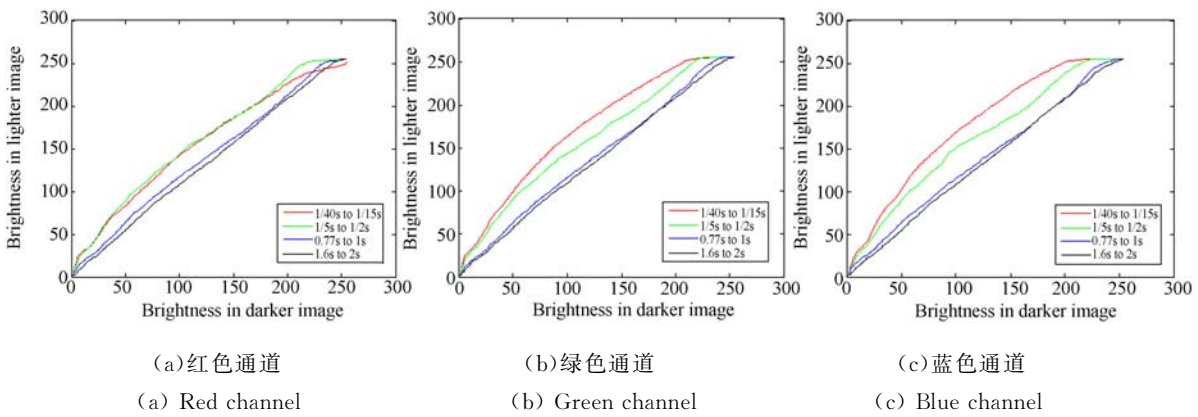
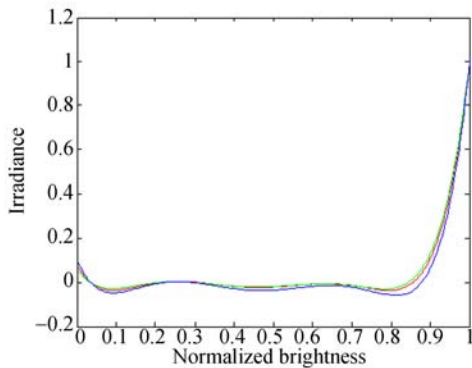


图 8 彩色输入图像不同色彩通道亮度传递函数曲线

Fig. 8 Brightness mapping function curves in different color channels

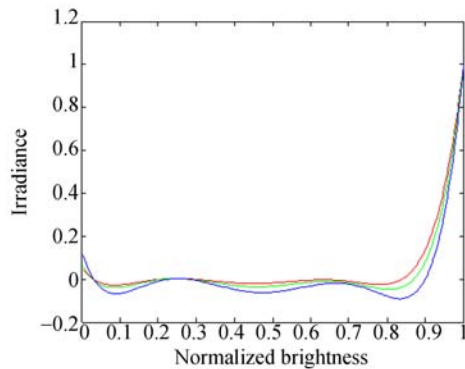
3.2.1 四帧输入图像相机响应函数标定结果

选择图 7(c)和图 7(d)、图 7(e)和图 7(f)获得两组亮度传递函数,将两组传递函数对应的图像亮度信息带入公式(8),获得相机响应逆函数,



(a)曝光比分别为(1/2)/(1/5)和 1/0.77

(a)Exposure ratio of (1/2)/(1/5) and exposure ratio of 1/0.77



(b)曝光比分别为 1/0.77 和 2/1.6

(b)Exposure ratio of 1/0.77 and exposure ratio of 2/1.6

图 9 四帧输入图像相机响应函数标定结果

Fig. 9 Calibration results of camera response function of four images

结果如图 9(a) 所示;选择图 7(e) 和图 7(f)、图 7(g) 和图 7(h) 获得两组亮度传递函数,将其对应的图像亮度信息带入公式(8),获得的相机响应逆函数如图 9(b) 所示。

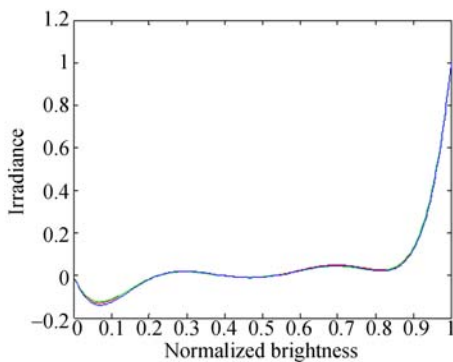
由图 9 可以看出,当输入图像帧数为四帧时能够得到较为符合相机响应函数特征的结果,且两组实验结果基本一致。所以利用四帧输入图像结合文中提出算法能够对存在动态影响的输入图像序列进行相机响应逆函数标定。

### 3.2.2 八帧输入图像相机响应函数标定结果

分别选取图 7(a) 和 7(b)、图 7(c) 和 7(d)、图 7(e) 和 7(f)、图 7(g) 和 7(h) 获得亮度传递函数,进而利用 4 组亮度传递函数获得 3 个通道的响应函数,如图 10(a) 所示。对图 7 中同样场景拍摄八帧不同曝光量的图像,利用 Debevec 和 Malik 提出的算法进行相机响应标定,标定结果如图 10(b) 所示。

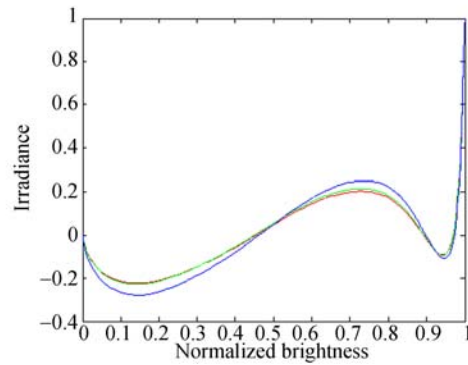
图 10(b) 表明 Debevec 和 Malik 提出的相机响应标定算法无法对存在动态影响的图像序列进行相机响应函数标定,而利用文中提出的算法,并采用四帧输入图像则能够获得较为理想的相机响应函数标定结果。

对存在动态影响下的相机响应函数标定结果进行定量评价,结果如表 2 所示。



(a) 本文方法结果

(a) Results of proposed algorithm



(b) Results of Debevec and Malik method

图 10 八帧输入图像相机响应函数标定结果

Fig. 10 Calibration results of camera response function of eight images

表 2 不同方法对存在动态影响图像的均方根误差

Tab. 2 Root-mean-square errors of different methods on moving image

	红色通道	绿色通道	蓝色通道
图 9(a) 标定结果	1.549 4	2.774 8	2.116 6
图 9(b) 标定结果	1.182 1	2.280 8	3.097 3
图 10(a) 标定结果	1.838 5	1.769 1	1.854 9
图 10(b) 标定结果	9.638 0	10.095 0	9.099 3

由表 2 可知,对存在动态影响的图像序列,本文算法仍能够获得较为理想的标定结果。

## 4 结 论

针对动态拍摄场景以及成像系统晃动对高精度相机响应函数标定的影响,本文通过分析彩色图像各通道的亮度统计特性,提出一种能够克服动态影响的基于亮度映射函数的相机响应函数标定算法。本文算法不是利用图像中的每个像素值信息进行相机响应函数标定的,而是通过不同曝光量图像之间的亮度映射函数进行相机响应函数的求解,从而避免了成像系统晃动或者拍摄场景的动态问题导致的图像配准误差给后续标定算法带来的影响,同时大大降低了计算复杂度,提高了计算效率。通过实验验证了本文算法针对动态影响的有效性,同时验证了最少需四帧输入图像就能够获得较为理想的相机响应函数标定结果。在后续的工作中需要进一步深入研究动态的影响程度与相机响应函数标定精度之间的关系。

## 参考文献:

- [1] NAYAR S K, MITSUNAGA T. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island*, 2000, 472-479.
- [2] MANN S, PICARD R W. On being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures[C]. *IS&T's 48th Annual Conference-Imaging on the Information Superhigh way, Final Program and Proceedings*, 1995; 422-428.
- [3] MANN S, MANN R. Quantigraphic imaging: estimating the camera response and exposures from differently exposed images[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, 842-849.
- [4] MITSUNAGA T, NAYAR S K. Radiometric self calibration[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1993; 374-380.
- [5] DEBEVEC P E, MALIK J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[J]. *SIGGRAPH 97 Conf. Proc., Computer Graphics Annual Conf. Series*, 1997; 369-378.
- [6] GROSSBERG M D, NAYAR S K. What is the space of camera response functions[C]. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, 602-609.
- [7] LIN S, GU J, YAMAZAKI S. Radiometric calibration from a single image[C]. *In Proceedings of the 2004 IEEE Society Conference on Computer Visual and Pattern Recognition*, 2004, 2: 938-945.
- [8] GROSSBERG M D, NAYAR S K. What can be known about the radiometric response from images[C]. *Proc. Euro Conf. on Comp Vision*, 2002, 189-205.
- [9] GROSSBERG M D, NAYAR S K. Modeling the space of camera response functions [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 10(26): 1272-1282.
- [10] TAI Y W, KIM S Y, YABNG J, *et al.*. Nonlinear camera response functions and image deblurring: theoretical analysis and practice[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 10(35): 2498-2511.
- [11] 余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1932-1938.  
YU Y, CHANG S T, WANG M, *et al.*. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1932-1938. (in Chinese)
- [12] 何舒文, 王延杰, 孙宏海, 等. 高动态科学级 CMOS 相机系统的设计[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(4): 729-735.  
HE SH W, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. Design of high dynamic scientific CMOS camera system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 729-735. (in Chinese)
- [13] 朴永杰, 徐伟, 王绍举, 等. 高动态范围视频的多曝光图像序列快速融合[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 1032-1041.  
PIAO Y J, XU W, WANG SH J, *et al.*. Fast multi-exposure image fusion for HDR video[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1032-1041. (in Chinese)
- [14] 郭慧楠, 曹剑中, 王华, 等. 高动态范围数字相机 sRGB 色彩空间管理[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(B12): 238-242.  
GUO H N, CAO J ZH, WANG H, *et al.*. Color management of sRGB color space for HDR digital camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(B12): 238-242. (in Chinese)
- [15] 许轰烈, 陈钱, 隋修宝, 等. 基于单调场景运动的复杂非均匀性校正[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3168-3172.  
XU H L, CHEN Q, SUI X B, *et al.*. Non-uniformity correction based on monotonous scene motion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3168-3172. (in Chinese)

## 作者简介:



都琳(1988—),女,辽宁瓦房店人,博士研究生,2010年于大连理工大学获得学士学位,2012年于装备学院获得硕士学位,主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。E-mail: daiquisundu@163.com

## 导师简介:



孙华燕(1963—),女,山东荣城人,教授,主要从事光电信息处理与对抗研究,曾获多项部委级科技进步奖。E-mail: shy221528@vip.sina.com