

基于单帧图像的相机响应函数标定算法

都琳¹ 孙华燕² 张廷华² 王帅¹

¹装备学院研究生院, 北京 101416

²装备学院光电装备系, 北京 101416

摘要 高动态范围成像技术能够避免因为拍摄方向如逆光和曝光量的不同而使图像存在亮度信息缺失和色差, 影响真实场景的信息采集。该技术有利于在复杂环境下获得更高的成像质量, 被广泛应用于模式识别、智能交通系统、遥感遥测、军事侦察等众多领域。相机响应函数的标定是高动态范围成像技术的关键, 能够建立真实场景的辐照度与采集图像亮度值之间的映射关系, 从而获得真实场景的高动态范围图像。所提出的算法通过单帧输入图像获得成像系统的相机响应函数, 大大地提高了计算效率, 并且适用于欠曝光及过曝光条件下采集的图像, 扩展了相机响应函数标定算法的应用范围。

关键词 成像系统; 高动态范围图像处理; 相机响应函数; 边缘颜色分布; 贝叶斯估计; 单帧图像

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0711003

Camera Response Function Calibration Algorithm Based on Single Frame Image

Du Lin¹ Sun Huayan² Zhang Tinghua² Wang Shuai¹

¹*Institute of Graduate Student, Academy of Equipment, Beijing 101416, China*

²*Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China*

Abstract High dynamic range imaging technique can avoid the brightness loss and aberration of the images because of shooting direction such as backlight and different exposures, which will affect the information collection of real scene. The technique is in favor of higher quality imaging in the complex environment and widely used in pattern recognition, intelligent transportation system, remote sensing, military reconnaissance and other research areas. Camera response function calibration is the key to the high dynamic range imaging technique, which can establish the mapping relation between real scene irradiance and acquired image brightness values. Thus the high dynamic range images in actual scene are acquired. The proposed algorithm can acquire the camera response function of the imaging system by single frame input image, and the calibration efficiency is enhanced greatly. Which is suitable for the under-exposure and over-exposure images, and expands the application range of camera response function calibration.

Key words imaging systems; high dynamic range image processing; camera response function; edge color distribution; Bayesian estimation; single frame image

OCIS codes 110.2970; 100.3008; 100.2960; 330.1690

1 引 言

高动态范围成像技术能够避免因为拍摄方向如逆光和曝光量的不同而使图像存在亮度信息缺失和色差, 影响真实场景的信息采集。该技术有利于在复杂环境下获得更高的成像质量, 因此被广泛应用于模式识别、智能交通系统、遥感遥测、军事监视侦察等众多领域, 具有重要的研究价值。许多计算机视觉应用的算法都需要对拍摄场景高动态范围的辐亮度信息进行精确的测量, 成像系统的相机响应函数(CRF)能够建立拍

收稿日期: 2016-01-05; **收到修改稿日期:** 2016-03-21

作者简介: 都琳(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事高动态范围图像处理方面的研究。E-mail: daiqisundu@163.com

导师简介: 孙华燕(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

摄图像亮度信息与场景辐亮度之间的严格映射关系,是高动态范围图像融合的关键技术。

目前已有的相机响应函数标定算法主要是将不同曝光的已配准的图像序列作为输入,在已知图像之间的曝光比例的情况下,建立图像各通道亮度信息与场景辐照度之间的映射关系,获得反映拍摄场景的高动态范围图像。但这通常需要让拍摄场景保持静态并假设图像序列照度一致,实际拍摄目标的动态以及成像系统的晃动往往并不能够完全满足该条件。Nayar 等^[1]以牺牲空间分辨率为代价通过具有空间变化透射率的图像滤波器获得变化曝光量。Mitsunaga 等^[2]利用多项式近似描述相机响应曲线,该方法的优势是在获得相机响应方程的同时能准确地求解曝光比例。Grossberg 等^[3]提出对相机响应函数集进行主成分分析法(PCA)获得相机响应函数模型,该方法避免了通过利用直方图分析的方法对不同曝光图像进行空间对齐的难点。

针对目前相机响应函数标定算法面临的问题,需要研究 1 种能够仅利用单帧未知相机设置参数的图像进行相机响应函数的标定。本文通过分析非线性的相机响应函数如何作用于输入图像,提出了通过建立边缘区域非线性分布到线性分布的映射,建立了图像亮度值与场景辐照度之间映射的相机响应函数。

2 相机响应函数

相机响应函数是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,用于表示采集图像亮度值与真实场景辐照度之间的映射关系,具有固有性、非线性、光滑连续性以及单调性^[4]。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。

大多数情况下成像系统的相机响应函数都是非线性的映射。在一般的成像系统中,单位曝光时间条件下图像的辐照度和场景的辐射度之间的关系可以表示为:

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

式中 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 为光线和光轴的夹角。

对于理想的成像系统而言,采集的辐照度值应该是 $I = E \times t$, t 为曝光时间,则理想的系统的辐照度与场景辐射度的线性响应函数可以表示为:

$$I = L \times z \times e, \quad (2)$$

式中 $z = \frac{\cos^4 \varphi}{h^2}$, $e = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times t$, e 为图像的曝光量,可通过改变光圈大小和曝光时间长短加以改变。通过成

像光学系统采集的数字图像亮度值 M 与辐照度值 I 之间的关系可以表示为: $M = f(I)$, f 为成像系统的相机响应函数,由多帧不同曝光量图像合成高动态范围图像的关键在于精确地标定相机响应函数。

目前大部分相机响应函数标定算法是利用多帧曝光图像求取该曲线,计算效率低、耗时长,并且需要假设多幅图像照度一致,但实际图像采集条件很难做到完全的照度相同,从而降低了相机响应函数标定的精度。基于单帧图像的相机响应函数标定算法通过在 1 帧图像上估计颜色边缘的红绿蓝(RGB)分布实现,自动选择适当的边缘信息,进而使用贝叶斯定理计算曲线,避免了采集条件不足带来的影响,从而提高了相机响应函数标定的精度与效率。

3 基于单帧图像的相机响应函数标定基本原理

利用 f 表示相机响应函数的映射关系, f 与场景辐照度值 I 对应被估计的图像上强度值 M 的关系可以表示为:

$$M = f(I), \quad (3)$$

由于相机响应函数具有单调的性质,所以存在反函数 $g = f^{-1}$,即 $I = f^{-1}(M) = g(M)$ 。根据场景中辐射度之间的线性比例关系得到不同曝光量图像之间的关系可以表示为:

$$g(m_A) = kg(m_B), \quad (4)$$

式中 m_A 是图像 A 上被估计点的图像强度, m_B 是图像 B 上对应点的强度, k 是 A 和 B 的曝光比率。通过(4)式可以看出,需要多幅曝光量不同的图像对相机响应函数进行解算,并且需要假设图像采集的过程辐射

度不变。为提高相机响应函数解算精度与效率,本文在被估计的图像上利用它的边缘颜色分布代替 2 幅图像对应点之间的关系,利用边缘颜色分布的非线性作用以及该分布提供的信息完成相机响应函数的标定。

3.1 边缘颜色分布

拍摄场景采集的图像以传感器矩阵存储场景的辐亮度值。由于分辨率限制,每个矩阵元素 x 反映了场景的 1 个固定角度,把图像上一系列的点记作矩阵元素 $S(x)$ 。对于彩色成像来说,每个矩阵元素都乘以 1 个颜色滤波 k ,通常是红、绿、蓝。在传感器阵列 x 点, k 颜色通道的图像辐照度 I 由元素滤波对的灵敏性 q_k 和 $S(x)$ 入射在图像平面上点 p 的入射场景辐亮度 R 决定,可以表示为:

$$I(x, k) = \int_{\lambda_k} \int_{p \in S(x)} R(p, \lambda) q_k(\lambda) dp d\lambda, \quad (5)$$

式中 λ_k 表示由颜色滤波 k 传播光波长度的范围。

分析边缘颜色分布,选择的图像块 P 中包含由单调色彩边缘划分的 2 个不同的颜色区域,各区域内颜色基本保持一致,如图 1(a)所示。由于有限的图像矩阵的空间分辨率,1 个边缘像素的图像平面区域 $S(x)$ 通常反映 2 个颜色区域的部分。1 个边缘像素 x 分成区域 $S_1(x)$ 和 $S_2(x)$,其相应的场景辐射度分别为 $R_1(\lambda)$ 和 $R_2(\lambda)$,入射到 x 的全部辐射度可表示为:

$$\int_{p \in S(x)} R(p, \lambda) dp = \int_{p \in S_1(x)} R_1(p, \lambda) dp + \int_{p \in S_2(x)} R_2(p, \lambda) dp = \alpha R_1(\lambda) + (1 - \alpha) R_2(\lambda), \quad (6)$$

式中 $\alpha = \int_{p \in S_1(x)} dp$ 与 $S(x)$ 是单元区域。将(5)~(6)式代入到(3)式中,得到 x 的估计颜色值可以表示为:

$$m(x, k) = f \left[\alpha \int_{\lambda_k} R_1(\lambda) q_k(\lambda) d\lambda + (1 - \alpha) \int_{\lambda_k} R_2(\lambda) q_k(\lambda) d\lambda \right] = f [\alpha I_1(x, k) + (1 - \alpha) I_2(x, k)], \quad (7)$$

假设图像的辐照度 I 与被估计的颜色 $f(I)$ 存在线性关系,则得到:

$$f [\alpha I_1 + (1 - \alpha) I_2] = \alpha f(I_1) + (1 - \alpha) f(I_2), \quad (8)$$

这意味着混合像元的估计颜色在 RGB 颜色空间中是成 1 条线的,其值在被估计区域颜色值 $f(I_1)$ 和 $f(I_2)$ 之间。但实际情况中, f 是典型的非线性函数,与直线相比,被估计边缘颜色形成了 1 条曲线,如图 1(c)所示,被估计颜色边缘的非线性分布提供了计算相机响应函数的信息。

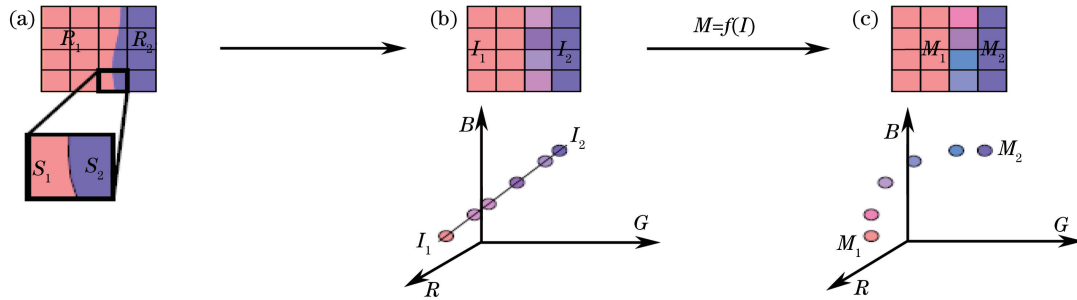


图 1 边缘区域测量颜色的非线性分布。(a) 观察集边缘信息;

(b) 边缘信息理想的辐照度线性分布; (c) 边缘信息实际的亮度非线性分布

Fig. 1 Non-linear distribution of measured colors in edge regions. (a) Edge information of observed set;

(b) ideal irradiance linear distribution of edge information; (c) actual brightness nonlinear distribution of edge information

逆相机响应函数能够获得被估计图像的亮度值对应的辐照度值,而辐照度值与拍摄场景的辐亮度值成线性关系,即能够反映拍摄场景的高动态范围图像所需的信息。边缘区域的图像辐照度呈线性分布,如图 1 (b)所示,所以逆相机响应函数应将非线性的边缘颜色分布转化为线性分布。对于选择的具有估计区域颜色 M_1 和 M_2 的边缘而言,逆相机响应函数 g 应将每个点 p 的被估计颜色 M_p 映射到由 $g(M_1)$ 和 $g(M_2)$ 定义的 1 条直线上,如图 2 所示。

逆相机响应函数 g 满足: $g(M_p)$ 到直线 $g(M_1)g(M_2)$ 的距离为 0,即:

$$\frac{| [g(M_1) - g(M_2)] \times [g(M_1) - g(M_p)] |}{|g(M_1) - g(M_2)|} = 0, \quad (9)$$

式中 \times 是两个向量的点积操作。

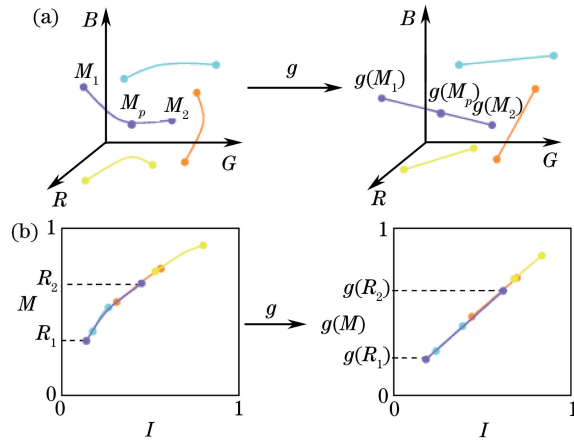


图 2 边缘颜色分布非线性转化为线性标定逆相机响应函数 g

Fig. 2 Transformation of non-linear edge color distributions to linear distributions by the inverse camera response function g

对于 1 个单独的区域颜色为 $M_1 = (R_1, G_1, B_1)$ 和 $M_2 = (R_2, G_2, B_2)$ 边缘块而言,逆相机响应函数能够将被估计的红色转化为由 R_1 和 R_2 划定的界限范围的红颜色,将被估计的绿色转化为由 G_1 和 G_2 划定界限范围的绿颜色,将被估计的蓝色转化为由 B_1 和 B_2 划定界限范围的蓝颜色。为更完全地覆盖被估计 R、G 和 B 颜色的范围,利用图像上所有构造的边界块观察集计算逆相机响应函数 g 。

对于 1 幅给定的图像,将所有获得的边缘颜色组放到观察集中, $\Omega = \{ \langle M_1, M_2, M_p \rangle \}$, 总距离定义可以表示为:

$$D(g; \Omega) = \sum_{\Omega} \frac{| [g(M_1) - g(M_2)] \times [g(M_1) - g(M_p)] |}{|g(M_1) - g(M_2)|}, \quad (10)$$

最理想的逆相机响应函数 g 就是该函数取最小总距离时获得的 g 。为了解决不同情况下的相机响应函数标定,对反函数 g 进行约束,定义 $g(0)=0, g(1)=1$ 。

3.2 构造观察集

所提出的算法需要利用输入单帧图像有效的边缘信息构造观察集,观察集需要采集图像不同的包含单调色彩边缘的区域部分,观察集包含的图像块需满足由单调色彩边缘划分为 2 个不同的颜色区域,各区域内颜色基本保持一致,可利用 Canny 算子的边缘检测算法选择非重叠的候选窗口构造观察集。需要对采样区域的两部分划分区域计算 R、G、B 通道的欧几里德距离值,如果测试采样区域的两部分颜色变化低于设定的阈值,则认为该区域是一致的。不同区域的颜色均值之间需至少保持 1 个设定的距离,否则图像的噪声会干扰(9)式距离的计算结果。由于相机响应函数具有单调的性质,R、G、B 3 种颜色的色彩边缘必须处于 2 个区域的颜色之间,这个约束条件能够避免振铃效应。对于满足上述条件的边缘窗口,提取其边缘像素的 3 种颜色边缘加入观察集合中。

3.3 贝叶斯估计

虽然通过最小化(10)式能够获得平滑单调的相机响应函数,但通过已经获得的真实的相机响应函数的先验信息能够提高相机响应函数的标定精度,先验信息能够对不完整的区间进行插值推算。利用基于 PCA 的相机响应函数模型,定义逆相机响应函数 g 表示为^[5]:

$$g = g_0 + cH, \quad (11)$$

式中 $g_0 = [g_{R_0}, g_{G_0}, g_{B_0}]^T$ 是反函数的均值, H 是一个列特征向量 $N=5$ 的矩阵, $c = [c_R, c_G, c_B]^T$ 是 1 个表示逆相机响应函数 $g = [g_R, g_G, g_B]^T$ 的 $R^{3 \times N}$ 的参数矢量。利用这些先验信息计算逆相机响应函数的极大后验概率。

3.3.1 先验模型

首先建立逆相机响应函数先验模型 $P(g)$ 。根据国际通用的由 Grossberg 和 Nayar 建立的 DoRF 数据库中已知的 201 条相机响应函数曲线,可以利用混合高斯模型对先验模型 $P(g)$ 进行描述:

$$P(g) = \sum_{i=1}^K \alpha_i N(g; \mu_i, \Sigma_i), \quad (12)$$

混合高斯模型使用 K 个高斯模型来表征图像中各个像素点的特征,基本为 3~5 个,在新 1 帧图像获得后更新混合高斯模型,用当前图像中的每个像素点与混合高斯模型匹配,根据经验值设定 $K=5$ 。

3.3.2 似然函数

理想的逆相机响应函数应能够满足使得(10)式中距离最小,所以利用指数分布建立距离信息的似然函数 $P(\Omega | g)$:

$$P(\Omega | g) = \frac{1}{Z} \exp[-\lambda D(g; \Omega)], \quad (13)$$

式中 λ 根据经验值设置为 10^4 , Z 是归一化常量。

3.3.3 贝叶斯估计方法

利用(12)式建立先验模型 $P(g)$ 以及(13)式建立距离信息的似然函数,以及贝叶斯框架^[6-7]阐述相机响应函数标定的问题。对于输入图像确定观察集 Ω 。根据对该问题进行最大后验概率估计,最优响应函数定义为:

$$g^* = \operatorname{argmax} [P(g | \Omega)] = \operatorname{argmax} [P(\Omega | g)P(g)], \quad (14)$$

式中先验模型 $P(g)$ 表示图像亮度值对应电荷耦合器件(CCD)上捕获亮度值的概率分布;条件概率模型 $P(g | \Omega)$ 表示图像亮度值在 RGB 空间的非线性分布转换为线性分布的程度,即图 2 中点 $g(M_p)$ 到线段 $g(R_1)g(R_2)$ 的距离。

对(14)式两端取对数,得到逆相机响应函数表示为:

$$g^* = \operatorname{argmin} [E(g)] = \operatorname{argmin} [\lambda D(g; \Omega) - \ln P(g)], \quad (15)$$

满足上式的 g^* 即为逆相机响应函数的最佳表达式,但利用该式直接获得的标定结果往往无法收敛稳定,所以需要结合优化算法对结果进行优化。Levenberg-Marquardt 算法通过采用系数矩阵阻尼的方法改变目标函数的病态,从而经过迭代获得目标函数的最优解,该算法通过选取合理的阻尼因子可使得所求目标函数局部渐进 2 阶收敛,从而可获得收敛至非线性方程的最小二乘解。利用 Levenberg-Marquardt 算法对得到的相机响应函数标定结果进行优化,将逆响应函数 g 的参数初始化为 0,可知当优化算法收敛时,在每一个维度利用局部搜索即可得到逆相机响应函数的最优化结果。

4 实验结果

4.1 SENTECH 相机实验结果及分析

4.1.1 观察集选取对实验结果的影响

利用 SENTECH/STC-SC33POTHS 工业相机对实验室场景同时包含明亮的光源以及黑暗区域设置不同的曝光量进行拍摄,采集图像如图 3 所示。根据 2.2 节构造 20×20 大小的观察集,图 3(a)结合 Canny 算子边缘检测构造观察集如图 4(a)所示,图 3(b)结合 Canny 算子边缘检测构造观察集如图 4(b)所示。



图 3 SENTECH 相机采集图像。(a) 曝光时间设置为 1/30 s; (b) 曝光时间设置为 1/60 s

Fig. 3 Image captured by SENTECH camera. (a) Expose time is 1/30 s; (b) expose time is 1/60 s

任意选取观察集获得其边缘颜色分布的空间三维模型,并对其进行数据拟合,从而利于后续的逆相机响

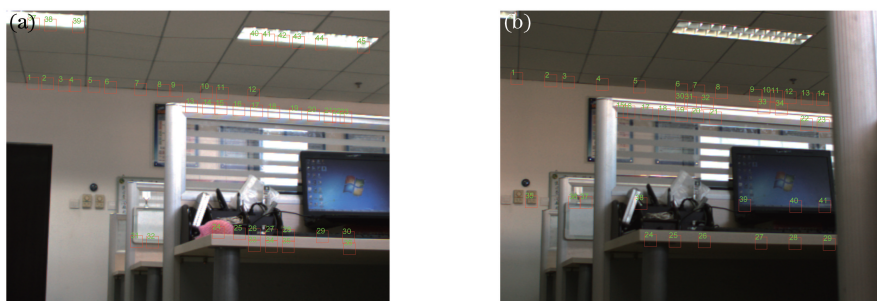


图 4 构造观察集

Fig. 4 Formation of observation set

应函数标定。由于篇幅有限,仅取图 4 中每帧图像的第 1 个观察集。图 4(a)中的第 1 个观察集的边缘颜色分布如图 5(a)所示,其边缘颜色分布的曲线拟合结果如图 5(b)所示;图 4(b)中的第 1 个观察集的边缘颜色分布如图 5(c)所示,其边缘颜色分布的曲线拟合结果如图 5(d)所示。为验证观察集中图像块大小的选取是否对相机响应函数的标定结果产生影响,构建了像素个数从 $10 \times 10 \sim 40 \times 40$ 的边缘图像块进行相机响应函数标定的对比分析,得出在观察集选取符合限制条件的情况下,图像块的大小基本不会影响相机响应函数的标定结果,但随着边缘图像块选取的增大,符合限制条件的边缘图像块选取则会越来越困难,且运算量增加,所以选取 20×20 的边缘块构建观察集较为合理。

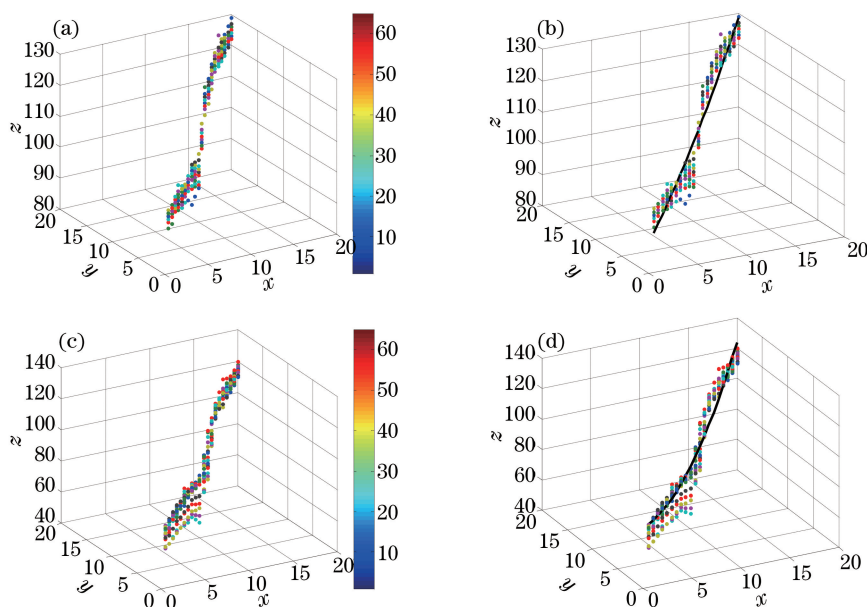


图 5 构造观察集。(a)图 4(a)观察集 1 的颜色边缘 RGB 空间分布;(b)图 4(a)观察集 1 的颜色边缘曲线拟合;

(a)图 4(b)观察集 1 的颜色边缘 RGB 空间分布;(b)图 4(b)观察集 1 的颜色边缘曲线拟合;

Fig. 5 Formation of observation set. (a) RGB distribution of color edge of observation set 1 in fig 4(a);

(b) curve fitting of color edge of observation set 1 in fig 4(a); (c) RGB distribution of color edge of observation set 1 in fig 4(b); (d) curve fitting of color edge of observation set 1 in fig 4(b)

4.1.2 算法优化结果分析

根据 3.3 节阐述相机响应函数标定结果,需利用 Levenberg-Marquardt 算法对得到的结果进行优化,若未加入优化算法则各颜色通道相机响应函数无法收敛一致,且每次运行的结果随机,无法获得稳定的相机响应函数标定结果,针对图 3(a)未加入优化算法进行 3 次标定运算结果分别如图 6 所示。

通过图 6 可以观察到构造观察集的边缘颜色分布信息,利用贝叶斯估计进行逆相机响应函数标定需结合 Levenberg-Marquardt 算法对结果进行优化,从而获得收敛稳定的逆相机响应函数标定结果。利用图 3(a)进行标定的结果如图 7(a)所示,利用图 3(b)进行标定的结果如图 7(b)所示。从图 7 中可观察到利用不同单帧图像构造观察集拟合的相机响应函数基本一致,且符合相机响应函数的固有性质。

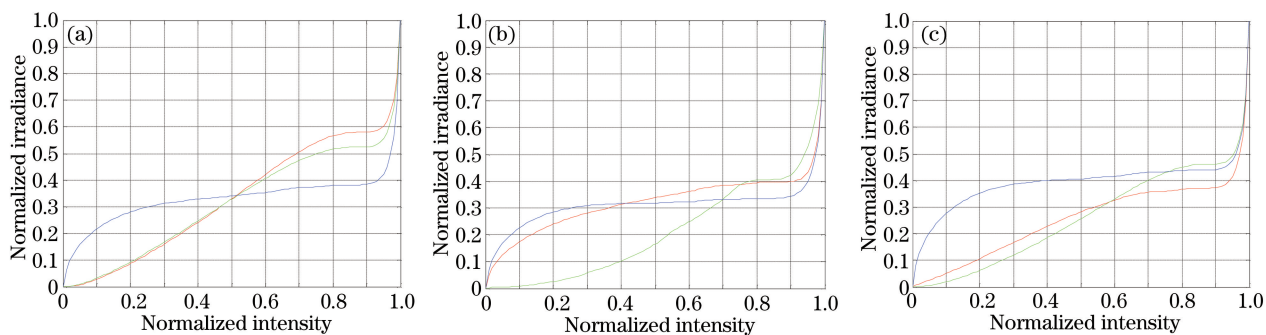


图 6 未优化的逆相机响应函数标定结果。(a)第一次未优化结果;(b)第二次未优化结果;(c)第三次未优化结果

Fig. 6 Results of inverse camera response function calibration without optimization. (a) First result without optimization; (b) second result without optimization; (c) third result without optimization

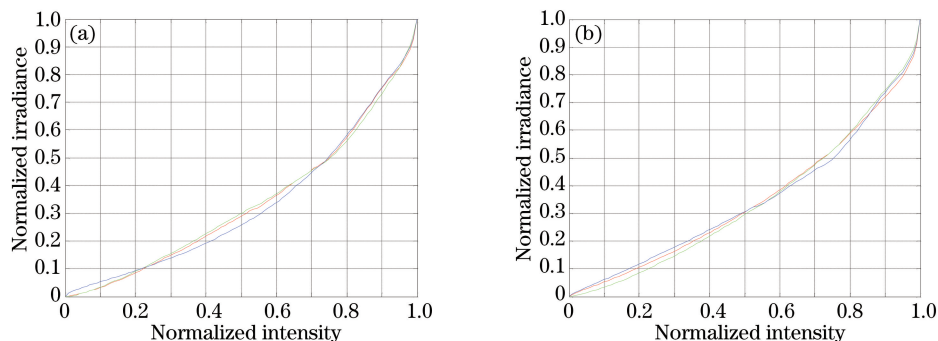


图 7 逆相机响应函数标定结果。(a)图 3(a)的逆相机响应函数标定结果;(b)图 3(b)的逆相机响应函数标定结果

Fig. 7 Calibration results of inverse camera response function. (a) Inverse camera response function of fig 3(a); (b) inverse camera response function of fig 3(b)

4.2 佳能 D90 相机实验结果及分析

4.2.1 不同曝光量输入图像相机响应函数标定结果分析

利用佳能 D90 相机对所提出算法的有效性进行验证,针对包含较亮及较暗区域的实验室场景设置合适的曝光量,将曝光时间设置为 1/5 s 如图 8(a)所示,利用所提出算法标定的逆相机响应函数结果如图 8(b)所示。为验证所提出算法能够在利用欠曝光以及过曝光单帧图像的情况下进行相机响应函数标定,利用佳能 D90 相机在欠曝光条件下即曝光时间设置 1/10 s 时采集图像如图 9(a)所示,在过曝光条件下即曝光时间设置 3 s 时采集图像如图 9(b)所示。利用所提出的相机响应函数标定算法对图 9(a)中欠曝光图像标定的逆响应函数结果如图 10(a)所示,对图 9(b)中过曝光图像标定的逆响应函数结果如图 10(b)所示。图 10 中利用欠曝光以及过曝光图像进行逆相机响应函数的标定结果与曝光量合适的图像标定结果一致,且符合相机响应函数的固有性质,验证了所提出算法适用于任意曝光量的单帧图像进行逆相机响应函数的标定,能够克服图像曝光量不合适给相机响应函数标定带来的困难,提高相机响应函数标定的应用范围。

4.2.2 不同相机响应函数标定算法结果对比分析

为进一步验证所提出算法的有效性,利用 Debevec 和 Malik 提出的利用多帧图像进行相机响应函数标定的算法^[8-12]对图 8(a)中同样场景拍摄的不同曝光量的 4 帧图像进行相机响应标定,标定结果如图 11(a)所示,所提出算法的标定结果如图 11(b)所示。通过图 11 不同相机响应函数标定算法获得的结果基本保持一致,可以验证所提出的基于单帧图像相机响应函数标定算法的有效性,且所提出算法能获得更加符合相机响应函数自身属性的较为理想的标定结果。

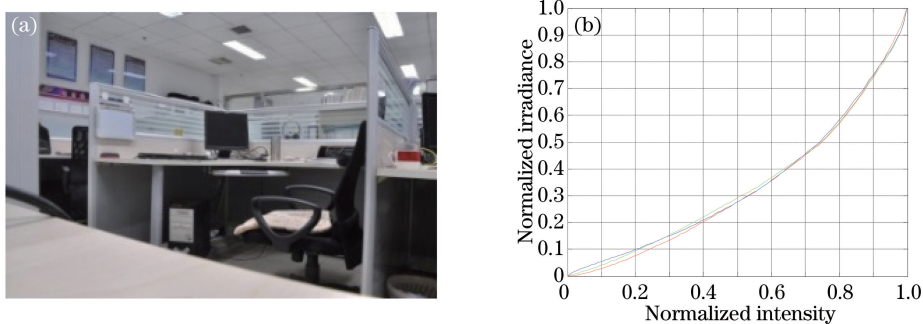


图 8 (a) 曝光量合适的图像; (b) 逆相机响应函数标定结果

Fig. 8 (a) Image with appropriate exposure; (b) Calibration result of inverse camera response function

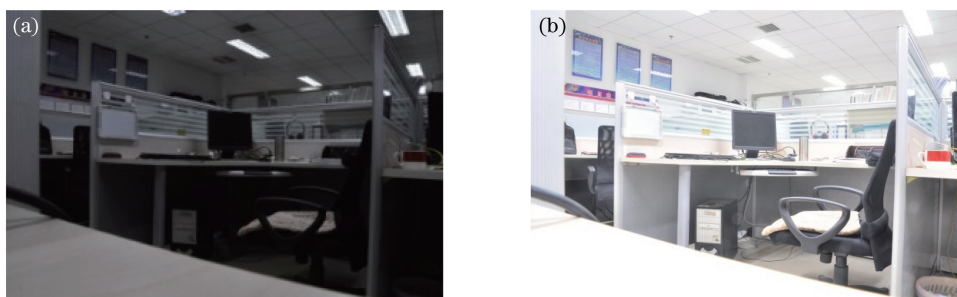


图 9 欠曝光以及过曝光量条件采集的图像。(a) 曝光时间设置为 1/10 s; (b) 曝光时间设置为 3 s

Fig. 9 Images of under-exposure and over-exposure. (a) Exposure time is 1/10 s; (b) exposure time is 3 s

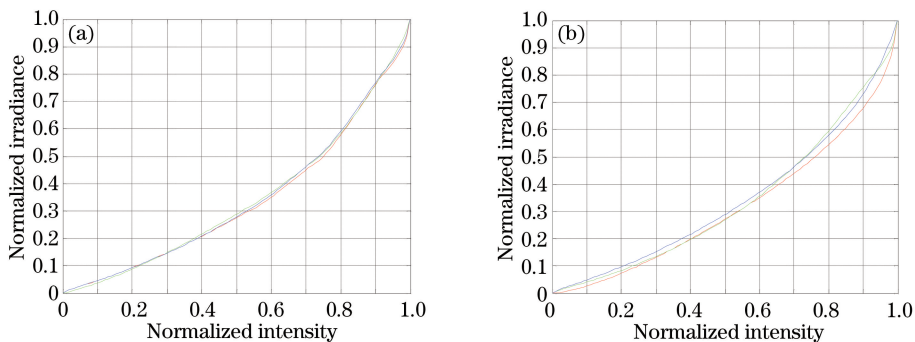


图 10 逆相机响应函数标定结果。(a)图 9(a)的逆相机响应函数标定结果;(b)图 9(b)的逆相机响应函数标定结果

Fig. 10 Calibration results of inverse camera response function. (a) Calibration result of inverse camera response function of fig 9(a); (b) Calibration result of inverse camera response function of fig 9(b)

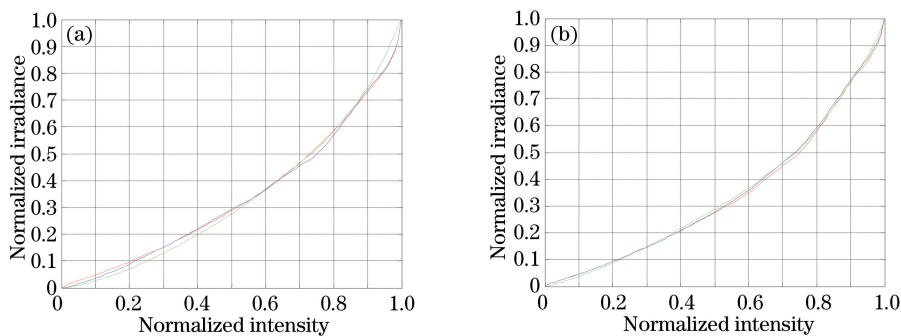


图 11 不同算法逆相机响应函数标定结果。(a) 多帧输入图像的标定结果; (b) 所提出算法的标定结果

Fig. 11 Calibration results of inverse camera response function with different algorithms.

(a) Calibration result of multiframe input images; (b) Calibration result of proposed algorithm

5 结 论

相机响应函数标定是高动态范围成像技术的关键技术,能够获得真实场景的辐照度与获得图像亮度值之间的映射关系。所提出基于单帧图像的相机响应函数标定算法,通过利用单帧图像有效的边缘颜色信息构造观察集,估计输入单帧图像的颜色边缘 RGB 分布,利用贝叶斯估计算法结合相机响应函数先验信息进行相机响应函数标定,并对结果进行优化从而获得高精度稳定的相机响应函数标定结果。通过实验验证所提出算法能够有效地利用任意曝光量的单帧输入图像获得成像系统的相机响应函数,从而大大地提高了计算效率,并且适用于曝光量设置不理想的情况如欠曝光或过曝光条件下采集的图像,从而扩展了相机响应函数标定算法的适用范围。在后续的研究过程中,需要进一步研究更加理想且计算量小的优化算法,通过构造更少的观察集进行高精度的相机响应函数标定。

参 考 文 献

- 1 Nayar S K, Mitsunaga T. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures[C]. IEEE, 2000, 1: 472-479.
- 2 Mitsunaga T, Nayar S K. Radiometric self calibration[C]. IEEE, 1999, 1: 374-380.
- 3 Grossberg M D, Nayar S K. What can be known about the radiometric response from images[C]. Proc Euro Conf on Comp, 2002, 2353: 189-205.
- 4 Reinhard E, Ward G, Pattanaik S, *et al.*. High dynamic range imaging: Acquisition, display and image-based lighting [M]. Morgan Kaufman, 2010: 171-183.
- 5 Grossberg M D, Nayar S K. Modeling the space of camera response functions[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(10): 1272-1282.
- 6 Ding Weili, Ma Pengcheng, Lu Ming, *et al.*. High resolution field depth reconstruction algorithm based on priori likelihood[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715002.
丁伟利, 马鹏程, 陆 鸣, 等. 基于先验似然的高分辨率光场图像深度重建算法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715002.
- 7 Leng Hanbing, Xie Qingsheng, Liu Wei, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction for IRFPA based on Bayesian estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910001.
冷寒冰, 谢庆胜, 刘 伟, 等. 基于贝叶斯估计的 IRFPA 自适应非均匀性校正[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910001.
- 8 Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]. Proceedings of the 24th annual conference on computer graphics and interactive techniques, 1997: 369-378.
- 9 Zhang Weixiang, Zhou Bingfeng. A robust HDR image calibration algorithm for camera response function[J]. Chinese Journal of Computers, 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.
- 10 Fang Huameng, Yi Benshun, Gan Liangcai, *et al.*. A fast calibration method of camera response function for high dynamic range image[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 43(6): 737-741.
方华猛, 易本顺, 甘良才, 等. 高动态范围图像合成中相机响应函数的快速标定[J]. 光子学报, 2013, 42(6): 737-741.
- 11 Lin S, Gu J, Yamazaki S. Radiometric calibration from a single image[C]. IEEE, 2004, 2: 938-945.
- 12 Tai Y W, Chen X G, Kim S Y, *et al.*. Nonlinear camera response functions and image deblurring: theoretical analysis and practice[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(10): 2498-2512.