

文章编号 1004-924X(2013)11-2980-09

用于高动态范围图像生成的 CCD 辐照度标定

江登表^{1*}, 李 勃¹, 陈启美^{1,2}

(1. 南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093;
2. 南京大学镇江高技术研究院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为了使低动态范围(LDR)图像采集设备能够生成高动态范围(HDR)图像, 研究了对同一场景进行多次曝光生成 HDR 图像的技术, 提出了不苛求输入图像为低噪声的 CCD 辐照度标定方法。为避免参数个数过多导致参数求解偏离全局最优值, 构建了大幅削减参数个数的能量函数, 该能量函数由 CCD 辐照度响应曲线参数模型、残差惩罚函数、权重函数 3 部分组成; 分别使用低拟合误差的 EMoR 参数模型、抑制图像高斯噪声的平方和残差惩罚函数、平衡图像噪声与截止域干扰的权重函数最优实现能量函数的各个部分, 继而通过快速迭代和精确迭代相切换的 Levenberg Marquardt (LM) 算法最小化能量函数求解参数。实验结果表明, 依据图像噪声大小和参数模型参数个数的不同, 拟合响应曲线的均方根误差 $RMSE \in [0.0022, 0.0163]$, 精度提高了 39%~90%, 处理时间缩短了 38%~56%, 得到的 HDR-LDR 映射图更忠实地反映了 LDR 图像序列的色彩特征, 且明暗细节清晰可见。

关键词: 高动态范围图像; CCD; 辐照度标定; 能量函数

中图分类号: TP391.4; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2980

CCD irradiance calibration algorithm for HDR image acquisition

JIANG Deng-biao^{1*}, LI Bo¹, CHEN Qi-mei^{1,2}

(1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
2. Zhenjiang High-Tech Research Institute of Nanjing University, Zhenjiang 212000, China)

* Corresponding author, E-mail: 19831212g@163.com

Abstract: To acquire a High Dynamic Range(HDR) image from the Low Dynamic Range(LDR) image acquisition equipment, the HDR image production technology was researched based on different exposure images in the same scene. Then, a CCD irradiance calibration method which doesn't require low noise images as the input was proposed. To avoid the deviation from the global optimum solution by excessive number of parameters, an energy function with fewer parameters consisting of the parameter model of CCD irradiance response curve, a residual penalty function, and a weighting function was proposed. The energy function was optimized by a low fitting error EMoR parameter model, squared residual penalty function suppressing image Gaussian noise, and the weighting function balancing image noise with deadline domain interference. Then the parameters were solved by minimizing energy function with Levenberg Marquardt(LM) algorithm which switched from rapid iteration to accurate it-

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61105015); 江苏省科技支撑计划资助项目(No. BE2011747); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2011511)

eration. Experimental results indicate that, with different number of model parameters and intensities of image noise, the response curve fitting Root Mean Squared Error(RMSE) $\in [0.0022, 0.0163]$, the accuracy is increased by 39%—90%, the processing time is reduced by 38%—56%, and the obtained HDR-LDR mapping image is more similar with LDR image sequences and all the details of bright and dark regions are visible clearly.

Key words: High Dynamic Range(HDR) image; CCD; irradiance calibration; energy function

1 引言

高动态范围(High Dynamic Range, HDR)图像技术分为高动态范围图像生成和低动态范围(Low Dynamic Range, HDR-LDR)映射两部分。当与实际场景的动态范围相对应的 HDR 图像生成后,由于用于 HDR 图像直接显示的设备尚不成熟,故需通过 HDR-LDR 映射得到通用 LDR 设备可以显示的图像。HDR-LDR 映射有效实施的前提是生成的 HDR 图像必须是对场景的真实映射,这需要尽可能高的动态范围,且 HDR 图像需与场景亮度成线性关系。

真实场景的 HDR 图像的生成方法可分为两大类:基于专门的硬件生成图像和基于多次曝光生成图像。前者通过特殊设计的设备来直接获取 HDR 图像^[1],优点是一次成像,不需后续处理;缺点是成像的动态范围受硬件决定、造价昂贵,难以普及。后者利用普通相机拍摄多张曝光系数不同的静态场景图像,再经由后续的图像处理来获得 HDR 图像。通过调节曝光系数,理论上可获得任意动态范围的图像。Mann^[2]从分析 CCD 响应模型出发,第一次通过 CCD 辐照度响应曲线(CCD Irradiance Response Curve,以下简称响应曲线)将不同曝光系数的 LDR 图像序列合成一张 HDR 图像。在上述方法中,如何降低图像噪声的影响,通过 CCD 辐照度标定得到精确的响应曲线是 HDR 图像生成的关键^[2-5]。本文首先分析了 HDR 图像的生成模型,指出 CCD 辐照度标定包括响应曲线的参数模型设计和能量函数构建两方面。利用 EMoR^[5]参数模型只需很少的参数即可对大多数型号相机响应曲线进行精确拟合的优点,同时为了避免能量函数中未知参数过多对稳定求解不利的问题,提出了一种参数个数大幅减少的能量函数的一般形式。该形式由响应曲线参数模型、残差惩罚函数、权重函数三部分组成。分别讨论了各部分的最优实现,继而通过快速迭代和精确迭代相切换的 LM 算法求解参数。

2 HDR 图像生成模型

CCD 辐照度响应模型如图 1 所示,通过调节光圈大小或快门长短来改变曝光系数 e , CCD 辐照度为场景辐射度 q 与曝光系数 e 的乘积; $f(\cdot)$ (或 $g(\cdot)$) 为响应曲线,用于描述 CCD 辐照度与图像灰度值 z 之间的映射关系。本来 CCD 电荷转移值与辐照度值是呈线性关系的,但为了迎合人眼的视觉特性以获得更好的色彩呈现能力,相机生产商人为地将响应曲线变为非线性。不同相机的响应曲线各异,且多数不公开,图 2 是 Grossberg^[5]提供的多款相机的响应曲线图:

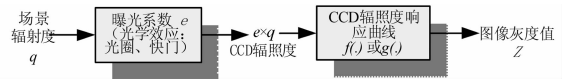


图 1 CCD 辐照度响应模型

Fig. 1 Response model of CCD irradiance

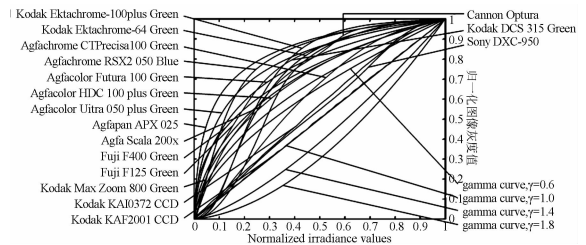


图 2 部分相机的响应曲线

Fig. 2 Response curves of some cameras

在过去 10 多年中,涌现出许多 HDR 图像生成方法,这些算法流程基本一致,都是将 CCD 辐照度标定作为算法关键。CCD 辐照度标定围绕以下两方面展开^[3-10]: (1) 使用更精确的响应曲线参数模型来提高拟合模型对真实响应曲线的表征能力,从而减少拟合误差。Grossberg^[5]提出的经验模型(EMoR)将 CCD 辐照度响应曲线设计约束为单调递增的函数,并将其和事先收集的各款相机的响应曲线数据库(DoRF)相结合,仅需 3 个

参数就能够使大多数相机的 CCD 辐照度响应曲线达到 99.5% 的拟合精度。(2) 由于拟合误差和图像噪声不可避免, 需设计合理的能量函数。因为不当的能量函数会导致求解的拟合模型参数偏离全局最优值, 甚至发散。

回顾 HDR 图像的基本生成流程: 假设场景和相机静止, 通过改变曝光系数 e 得到图像序列, 则对于任一像素点 i , 其场景辐射度 q_i 都是时序恒定的。 z_i^j 表示图像序列中第 j 帧图像的第 i 个像素的灰度值(假设灰度值为 8 bit, 则动态范围 $z \in [0, 255]$), e^j 表示第 j 帧图像的曝光系数。其中, $i=1, \dots, M$ 表示图像像素位置一维化后的索引; $j=1, \dots, N$ 表示图像序列的帧号索引。在 e^j ($j=1, \dots, N$) 中存在一个共同的比例系数, 不妨设该比例系数为 e^1 。则描述 q_i 与 z_i^j 之间映射关系的响应曲线为:

$$z_i^j = f(e^j \times q_i). \quad (1)$$

因为 $f(\cdot)$ 为单调递增函数^[18], 对 $f(\cdot)$ 取反函数后, 再取对数, 得到响应曲线的另一形式, $g = \ln f^{-1}$:

$$g(z_i^j) = \ln q_i + \ln e^j. \quad (2)$$

以图像序列 z_i^j ($i=1, \dots, M; j=1, \dots, N$) 为输入, 由式(2)构造超定方程组:

$$\begin{cases} g(z_1^1) - \ln q_1 - \ln e^1 = 0 \\ g(z_1^2) - \ln q_2 - \ln e^2 = 0 \\ \dots \quad \dots \\ g(z_M^N) - \ln q_M - \ln e^N = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

超定方程组式(3)由 $M \times N$ 个方程组成, 而待求参数有 $\mathbf{Q} = \{q_1, \dots, q_M\}$ 、 $\mathbf{E} = \{e^1, \dots, e^N\}$ 、 $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_P\}$, 其中, 向量 \mathbf{C} 为响应曲线参数模型 $g(z)$ 的 P 个待求参数, 共有 $M+N+P$ 个待求参数。因为图像中像素个数 M 远大于 N 和 P , 有 $M \times N \gg M+N+P$, 故式(3)为超定方程组。通过构建并最小化能量函数求解式(3)的待求参数向量组 \mathbf{E}, \mathbf{C} ^[3]:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{Q}, \mathbf{E}, \mathbf{C}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ \omega(z_i^j) \times (g(z_i^j) - \ln q_i - \ln e^j) \}^2 \right\}. \quad (4)$$

在式(4)中, 考虑到图像灰度值 z 在动态范围两端截止, 设置权重函数 $\omega(z)$, 对不同的图像灰度值 z 在能量函数中赋予相应权重。由式(2)得到:

$$\ln q_i = g(z_i^j) - \ln e^j. \quad (5)$$

利用 $\omega(z)$ 对式(5)加权, 得到 HDR 图像 $\mathbf{Q} = \{q_1, \dots, q_M\}$ ^[3]:

$$\ln q_i = \frac{\sum_{j=1}^N (\omega(z_i^j) (g(z_i^j) - \ln e^j))}{\sum_{j=1}^N \omega(z_i^j)}. \quad (6)$$

3 CCD 辐照度标定

3.1 能量函数的一般式

在式(4)中, 能量函数的待求参数向量组由 $\mathbf{Q}, \mathbf{E}, \mathbf{C}$ 组成, 共计 $M+N+P$ 个待求参数。图像的像素个数 M 通常很大, 以低分辨率的 CIF 格式图像为例, $M=352 \times 288=101\,376$ 。由于待求参数过多不利于能量函数的稳定求解, 故在图像序列 z_i^j ($i=1, \dots, M; j=1, \dots, N$) 中对第 $j, j+1$ 帧图像中相同的像素点, 由式(2)消除 $\ln q$, 得到超定方程组:

$$\begin{cases} g(z_1^j) - g(z_1^{j+1}) - \ln e^j + \ln e^{j+1} = 0 \\ \dots \quad \dots \\ g(z_M^N) - g(z_M^{N-1}) - \ln e^N + \ln e^{N-1} = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

由于消除了 q_i ($i=1, \dots, M$), 超定方程组的待求参数由式(3)的 $M+N+P$ 个降至式(7)的 $N+P$ 个。借鉴文献[3]的方法, 得到能量函数的一般形式:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{E}, \mathbf{C}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \varphi[\omega(z_i^j) \times \omega(z_i^{j+1}) \times (g(z_i^{j+1}) - g(z_i^j) - \ln e^{j+1} + \ln e^j)] \right\}. \quad (8)$$

式(8)由 CCD 辐照度响应曲线的参数拟合模型 $g(z)$ 、残差惩罚函数 $\varphi(\cdot)$ 、权重函数 $\omega(z)$ 三部分组成, 分别讨论它们的最优实现, 继而通过快速迭代和精确迭代相切换的 Levenberg-Marquard^[19] (LM) 算法以快速精确计算待求参数向量组。其中, 参数拟合模型 $g(z)$ 决定了对真实响应曲线拟合误差的大小; 权重函数 $\omega(z)$ 决定了不同灰度值 z 在能量函数中的权重系数。针对能量函数, 本质上可看作是估计残差的惩罚函数, 因此, 可统一描述为 $\varphi(\cdot)$ 形式, $\varphi(\cdot)$ 决定了对输入数据与估计数据之间差异的惩罚原则。目前有多种方法从不同理论角度对其进行描述, 最为常见的是 L_1, L_2 范数形式, 两者对估计残差分别赋予不同的加权惩罚规则。本文依据图像噪声的特点, 从加权惩罚规则的角度讨论惩罚函数 $\varphi(\cdot)$ 的具体实现。

3.2 响应曲线参数模型

Debevec^[3] 方法中, $g(z)$ 不受任何拟合模型

的约束而取离散值,即 $C = \{g(z) | z = 0, \dots, 255\}$ 。理论上,它可实现对任意波形响应曲线的完全拟合,但缺点是没有参数模型先验地约束曲线的形状,且需要 $P = 256$ 个未知量来描述 $g(z)$,在最小化能量函数的过程中容易发散。更多文献使用参数拟合模型,仅需很少的参数即可实现对响应曲线的描述,但所用参数模型难以表征不同响应曲线的波形特征,而存在拟合误差。其中, Mann^[7] 假设 $g(z)$ 为伽玛曲线,即 $g(z) = c_1 + c_2 \times z^{c_3}$,但其参数个数固定,即 $P = 3$,无法通过增加参数的个数来降低拟合误差; Mitsunaga^[7] 假设 $g(z)$ 为多项式,这虽然可以增加参数个数来提高拟合精度,但并不能消除拟合误差,且参数过多,最小化能量函数时容易过拟合; Grossberg^[5] 所提出的经验模型(EMoR),将 CCD 辐照度响应曲线设计约束为单调递增的函数,并和事先收集的各款相机的响应曲线数据库(DoRF)相结合,仅用 3 个参数对大多数相机的 CCD 辐照度响应曲线的拟合精度就能够达到 99.5%。本文使用 EMoR 作为 $g(z)$ 拟合参数模型的最优选择:

$$g(z) = g_0(z) + \sum_{p=1}^3 c_p g_p(z), \quad (9)$$

其中,通过对 DoRF 使用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)得到基函数 $g_p(z)$, c_p 为待求参数。 p 越小, $g_p(z)$ 在 $g(z)$ 中的权重越大, $g_0(z)$ 是 DoRF 的均值,其在 $g(z)$ 中的权重最大。

3.3 残差惩罚函数

最为常用的残差惩罚函数是绝对值函数($\varphi(\cdot) = |\cdot|$, L_1 范数)和平方函数($\varphi(\cdot) = (\cdot)^2$, L_2 范数)。在最小化能量函数时,两种函数对残差的惩罚原则不同,前者对于不同大小的残差赋予相同的权重,而后者会对不同残差赋予与其大小等对应的权重。选择何种惩罚函数依输入数据的噪声分布而定,本文选择平方函数为最优实现,因为:(1)平方函数从 Bayesian 统计理论出发,假设噪声服从高斯分布,这符合大多数图像噪声的实际分布情况;(2)平方函数在 0 点可导,可通过最大似然函数来显式求解拟合曲线;(3)平方和函数对大残差赋予大的权重,可以更好地抑制强噪声的影响。

3.4 权重函数 $w(z)$

场景亮度范围远大于 CCD 响应范围,将 CCD 所能够响应的有限区域称之为动态域,其他区域为

截止域。只有在动态域, CCD 辐照度响应曲线才有意义,其对应的图像灰度值 z 在能量函数中才是可信的。不考虑噪声的理想状态下,动态域所对应的图像灰度值范围为 $z \in (0, 255)$, 截止域为 z 等于 0 或 255 的灰度值点。此时,为消除截止域的干扰, $w(z)$ 取离散值,即在 $z = 0$ 或 $z = 255$ 的灰度值点 $w(z)$ 取零,其他区域,取 1。Debevec^[8] 认为由于噪声的存在,动态域与截止域依概率地相互重叠,更新 $w(z)$:

$$w(z) = \begin{cases} z/127 & z \leq 127 \\ (255 - z)/127 & z > 127 \end{cases} \quad (10)$$

但其忽视了 $w(z)$ 对 HDR 图像噪声大小的影响。由式(6)得到 HDR 图像的噪声方差 $\sigma(\ln \tilde{q}_i)$:

$$\sigma(\ln \tilde{q}_i) = \frac{\sum_{j=1}^N w(z_j^i) \sigma(g(z_j^i) - \ln e^j)}{\sum_{j=1}^N w(z_j^i)} \quad (11)$$

由上式可知,一方面,为了抑制 HDR 图像的噪声,需最小化 $\sigma(\ln \tilde{q}_i)$, 则意味着在式(11)中 $w(z)$ 的取值趋于相等。另一方面,由于动态域与截止域的重叠,不同的灰度值 z 在能量函数中的可信度不一致使权重函数 $w(z)$ 取值不等。故两者相互冲突,具体分析截止域所对应的灰度取值范围,在无图像噪声的理想情况下,截止域为 $z = 0$ 或 $z = 255$ 的灰度值点。在实际情况下,依据噪声的强弱,截止域的范围依概率地扩散至 $z = 0$, $z = 255$ 的邻域内,邻域的范围取决于图像噪声方差的大小。图像噪声方差越大,则截止域的宽度增加,反之,截止域的宽度会减小,据此构建权重函数:

$$w(z) = 1 - \left(\frac{2z}{255} - 1 \right)^{2\beta} \quad (12)$$

在式(12)中, $w(z)$ 的波形可分成对应动态域的平坦区域和对应截止域的上升/下降沿区域。其中, $w(z) > 0.9$ 为动态区域, $w(z) < 0.9$ 为截止区域, $w(z) = 0.9$ 为临界点。 β 的取值为满足 $w(\sigma) > 0.9$ 前提下的最小自然数,即:

$$\beta = \underset{\beta \in \mathbb{N}}{\operatorname{argmin}} \{w(\sigma) > 0.9\}, \quad (13)$$

其中: σ 为根据文献[21]估计的图像噪声,此时 β 可在“截止域干扰消除”和“图像噪声抑制”之间平衡。

3.5 参数快速收敛

本文使用 LM^[12] 迭代法最小化能量函数。设置响应曲线的迭代初始值为 DoRF 的均值,所有图像

曝光系数的迭代初始值相等,即 $C^{(0)}=0, E^{(0)}=1$ 。LM 迭代法是一种非线性迭代,它对噪声具有良好的鲁棒性,缺点是运算量会随待求参数的增加而快速上升。为了快速求解参数,将最小化能量函数分为快速迭代收敛和精确迭代收敛两个阶段。在快速收敛阶段,通过对式(8)进行 LM 迭代求取向量组 \mathbf{C} ,而向量组 \mathbf{E} 由式(14)的方程组求取:

$$\begin{cases} \ln e^2 - \ln e^1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (g(z_i^2) - g(z_i^1)) \\ \dots & \dots \\ \ln e^N - \ln e^{N-1} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (g(z_i^N) - g(z_i^{N-1})) \end{cases} \quad (14)$$

其中,式(14)由式(7)求和得到。在快速迭代若干次后,再转为通过对式(8)进行 LM 迭代求取的精确方式,使向量组 \mathbf{C}, \mathbf{E} 收敛至一定精度。

4 实验及结果分析

在 DoRF 数据库中任选一组响应曲线,并加入高斯噪声来得到合成输入数据,如图 3(a)-3(c)所示,其中, $I_x = z_i^j + \varepsilon(\sigma), I_y = z_i^{j+1} + \varepsilon(\sigma)$,噪声方差 σ 分别为 3、8、20。对比分析 Grossberg^[5]描述的方法(改进前的方法)和本文的方法(改进后的方法)。在图 3(d)-3(f)中,令拟合参数模型的参数个数 P 分别取 3 和 5,分别使用改进前、改进后的算法求取 CCD 辐照度响应曲线。当 $\sigma=3$ 时,无论 $P=3$ 或 $P=5$,2 种方法都能很好地拟合真实的 CCD 辐照度响应曲线;当 $\sigma=8$ 时,改进前方法所使用的参数个数为 $P=5$,比 P 为 3 时的拟合效果要好,而改进后的方法,在 $P=3, P=5$ 时都能很好地拟合真实的响应曲线;当 $\sigma=20$ 时,改进前方法拟合的响应曲线发散明显,且 $P=5$

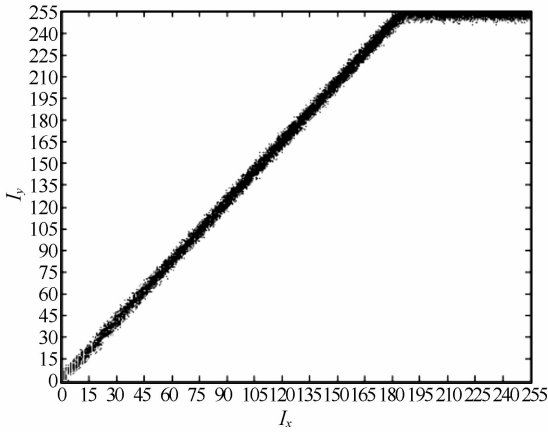
时的发散程度更为剧烈,已不满足响应曲线单调递增的设计约束;而改进后的方法,在 $P=3, P=5$ 时都能很好地拟合出真实的响应曲线,其中, $P=5$ 时拟合效果更好。值得注意的是,改进前后的方法在任何噪声下,均能保证拟合的响应曲线收敛至图像灰度值(0、255)处,不存在章玉祥^[4]和 Mitsunaga^[7]所讨论的截止域发散问题,这是 EMoR 固有的优点。但是 EMoR 并不能保证所拟合的响应曲线单调递增,且对输入数据所含噪声敏感,在输入数据含有大量噪声的情况下,如果试图通过增加拟合模型的参数个数来提高精度,反而会导致拟合的响应曲线不满足单调递增的设计约束(如图 3(f)所示),而本文方法在各种噪声干扰下,均能精确拟合响应曲线。

如表 1 所示,设噪声方差分别为 3、8、20,响应曲线的拟合模型的参数分别为 $P=3, P=5$,分别使用改进前、改进后的方法得到多组拟合响应曲线的均值,并通过均方根误差(RMSE)将其与真实响应曲线进行定量比较。依据噪声方差大小和拟合模型参数个数的不同,改进前方法的 $RMSE \in [0.0036, 0.1607]$,改进后方法的 $RMSE \in [0.0022, 0.0163]$ 。与改进前方法相比,改进后方法的 RMSE 下降了 39%~90%,可见改进后方法能够很好地消除各类噪声的不利影响,得到全局最优参数,实现响应曲线的精确拟合。此外,对比了改进前、改进后方法的计算量,因为图像噪声大小对迭代收敛的条件会有影响,不同的参数个数的计算时间也不同,所以表 1 中分别列出不同参数个数和不同噪声方差大小所需的处理时间均值,改进前的方法处理时间 $t_1 \in [1.24, 4.31]$,改进后的方法由于使用了求解参数削减的能量函数,参数收敛速度加快,处理时间 $t_2 \in [0.76, 1.89]$,处理时间缩短了 38%~56%。

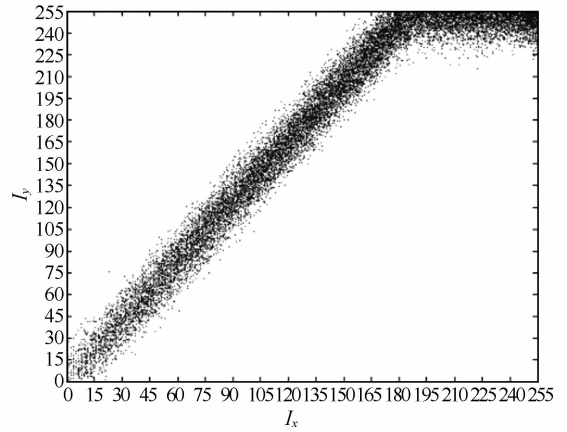
表 1 改进前、改进后方法的拟合响应曲线的 RMSE 和处理时间比较

Tab. 1 Comparison of processing time and RMSE for fitting response curve between original and improved methods

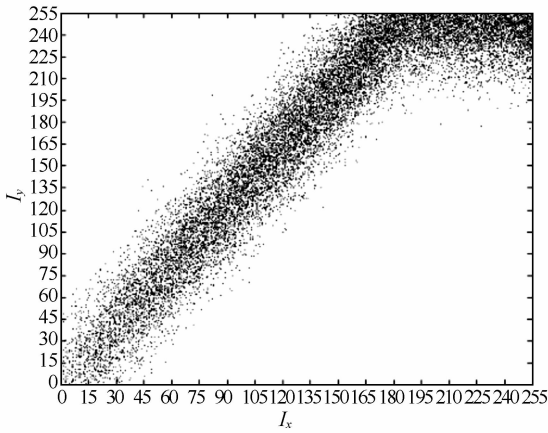
方法	数据序号	$P=3$	$P=5$	$P=3$	$P=5$	$P=3$	$P=5$
		$\sigma=3$	$\sigma=3$	$\sigma=8$	$\sigma=8$	$\sigma=20$	$\sigma=20$
改进前方法	RMSE	0.004	0.0036	0.0736	0.0398	0.1607	0.1107
	处理时间	1.24	2.89	2.31	3.89	3.22	4.31
改进后方法	RMSE	0.0032	0.0022	0.0096	0.0085	0.0163	0.0148
	处理时间	0.76	0.98	1.12	1.43	1.57	1.89



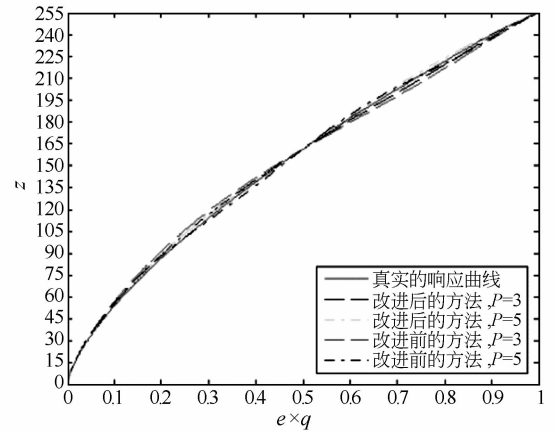
(a) 输入数据, $\sigma=3$
(a) Input data, $\sigma=3$



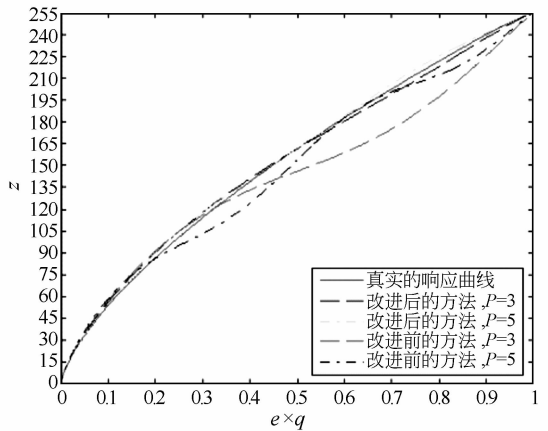
(b) 输入数据, $\sigma=8$
(b) Input data, $\sigma=8$



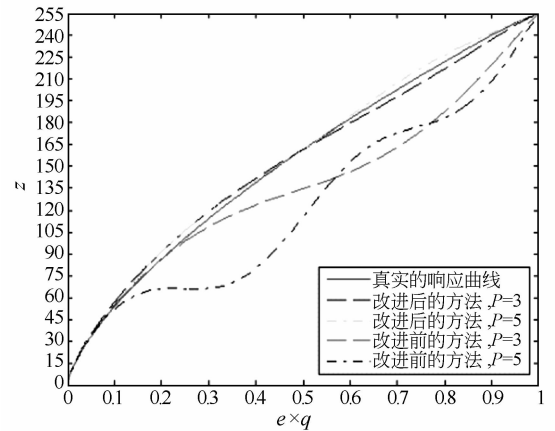
(c) 输入数据, $\sigma=20$
(c) Input data, $\sigma=20$



(d) 响应曲线, $\sigma=3$
(d) Response curve, $\sigma=3$



(e) 响应曲线, $\sigma=8$
(e) Response curve, $\sigma=8$



(f) 响应曲线, $\sigma=20$
(f) Response curve, $\sigma=20$

图 3 输入数据与响应曲线

Fig. 3 Input data and response curve

测试 LDR 图像序列, hdrsoft 图像库包含多组在不同曝光系数下拍摄得到的室内外静态场景

图像的 LDR 图像序列^[20],任一单幅 LDR 图像中仅能观察到很有限的亮度范围细节,这是由于场

景动态范围很广,已经超出了 CCD 的动态范围,单次曝光的图像不能同时兼顾图像中的暗区域和亮区域。选择教堂、海景图像序列作为 LDR 图像序列(参见图 4,图 6),分别使用改进前和改进后的方法得到响应曲线,由式(6)生成 HDR 图像,继而得到 HDR-LDR 映射图^[16](参见图 5,图 7)。与单张 LDR 图像相比,改进前方法得到的 HDR-LDR 映射图观察到的亮度范围场景更广,但其缺点是会改变原 LDR 图像序列局部区域的色彩,并在低亮度和高亮度区域丢失部分细节信息。这是因为改进前的方法易受噪声干扰,从而导致拟合的响应曲线与真实的响应曲线之间存在差异,尤其是在有截止效应存在的高亮度和低亮度区域,这种差异会加剧。相比而言,改进后方法得到的 HDR-LDR 映射图能够呈现更广亮度范围的场景,更忠实于 LDR 图像序列的色彩特征,并保留更多的图像细节内容。

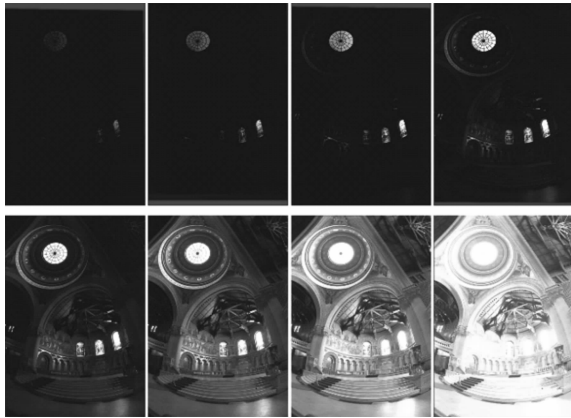


图 4 LDR 图像序列 1

Fig. 4 LDR image sequence 1

(a) 改进前方法的处理结果
(a)Results of original method(b) 改进后方法的处理结果
(b)Results of improved method

图 5 HDR-LDR 映射图 1

Fig. 5 HDR-LDR mapping 1



图 6 LDR 图像序列 2

Fig. 6 LDR image sequence 2

(a) 改进前方法的处理结果
(a)Results of original method(b) 改进后方法的处理结果
(b)Results of improved method

图 7 HDR-LDR 映射图 2

Fig. 7 HDR-LDR mapping 2

5 结 论

基于多次曝光的 HDR 图像生成具有实施简单、成本低廉的优点。本文总结了基于多次曝光的 HDR 图像生成的模型,指出 CCD 辐照度标定可以围绕相机响应函数的参数模型设计和能量函数构建两方面展开。利用 EMoR 参数模型仅需很少的参数即可实现对大多数响应曲线精确拟合的优点,提出了一种参数个数大幅减少的能量函数的一般形式,该一般形式由响应曲线参数模型、残差惩罚函数、权重函数三部分组成。分别讨论了各部分的最优实现,继而通过快速迭代和精确迭代相切换的 LM 算法求解参数。实验结果表明,依据图像噪声大小和参数模型参数个数的不同,拟合响应曲线的 $RMSE \in [0.002\ 2, 0.016\ 3]$,精度提高了 39%~90%,处理时间缩短了 38%~56%,得到的 HDR-LDR 映射图更真实地反映了 LDR 图像序列的色彩特征,且明暗细节清晰可见。

在后面的工作中,希望能将本文方法应用到特征点提取、图像拼接、二维场景辐射度标定等图像处理算法中^[14],以期得到更佳的效果。相比于 LDR 图像单通道 8 bit 位深,HDR 图像单通道拥有 16 bit 甚至更高的位深,能够呈现更多的图像细节,但运算量也随之迅速增加,这在实时处理

要求高的图像处理应用是一大挑战。基于显卡 (Graphic Processing Unit, GPU) 的统一计算设备架构 (Compute Unified Device Architecture, CUDA) 技术具备上百个并行处理单元同时运算的能力, CUDA 技术特别适合图像处理的像素并

行运算,与 CPU 有限的并行能力相比,其运算速度可以提高几十倍,甚至上百倍,可以突破基于 HDR 的图像处理算法的实时性瓶颈。同时,基于 C 语言的开发环境,相比基于 FPGA 的硬件描述语言,更容易为图像处理算法研发人员接受。

参考文献:

- [1] 薛旭成, 韩诚山, 薛栋林, 等. 应用双排 TDI CCD 提高空间推扫遥感相机动态范围[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2791-2795.
XUE X CH, HAN CH SH, XUE D L, *et al.*. Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2791-2795. (in Chinese)
- [2] MANN S, PICARD R W. Being 'Undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures[C]. *Proceedings of the Conference on Imaging Science and Technology, Los Angeles, USA, 1995: 422-428.*
- [3] 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, Los Angeles, USA: ACM, 1997: 369-378.*
- [4] 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): 658-661.
ZHANG W X, ZHOU B F. A robust HDR image calibration algorithm for camera response function [J]. *Chinese Journal of Computer*, 2006, 29(4): 658-661. (in Chinese)
- [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] 任建伟, 张艳琪, 叶剑, 等. CCD 辐射响应函数矩阵的建立与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 957-962.
REN J W, ZHANG Y Q, YE ZH, *et al.*. Establishment and application of CCD radiation response function matrix [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 957-962. (in Chinese)
- [7] MITSUNAGA T, NAYAR S K. Radiometric self calibration [C]. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, USA: IEEE, 1999, 374-380.*
- [8] 张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.
ZHANG XL, LIU Y, SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision [J]. *Chinese Optics.*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)
- [9] 任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
REN J W, LIU Z X, WAN ZH, *et al.*. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat spacecamera with wide viewing field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
- [10] 陈健, 王伟国, 高慧斌, 等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 423-430.
CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al.*. Radiation calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics.*, 2012, 5(4): 423-430. (in Chinese)
- [11] GROSSBERG M D, NAYAR S K. Determining the camera response from images: What is knowable [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(11): 1455-1467.
- [12] MORE J J. The levenberg-marquardt algorithm implementation and theory [J]. *Numerical Analysis*, 1978, 630: 105-116.
- [13] ROSIN P L. Thresholding for change detection [C]. *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay, India: IEEE, 1998, 274-279.*
- [14] 王红睿, 方伟. 自动寻日的太阳辐照绝对辐射计[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 252-258.
WANG H R, FANG W. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking [J]. *Chinese Optics.*, 2011, 4(3): 252-258. (in Chinese)

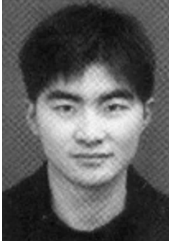
作者简介:



江登表(1983—),男,安徽合肥人,博士研究生,2009年于桂林理工大学获得硕士学位,主要从事相机辐射度标定、机器视觉等方面的研究。E-mail: 19831212g@163.com



陈启美(1949—),男,江苏南京人,硕士,教授,博士生导师,1982年于清华大学获得硕士学位,主要从事网络通信、智能交通等方面的研究。E-mail: chenqimei@nju.edu.cn



李 勃(1982—),男,湖南湘潭人,博士,副教授,2009年于南京大学获得博士学位,主要从事机器视觉、人工智能等方面的研究。E-mail: liboee@nju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)
(本栏目编辑:李自乐)