

相机响应函数标定算法研究进展

都琳,孙华燕,李迎春,徐韬祐
(解放军装备学院,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和色差影响真实场景的信息采集,有利于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。相机响应函数的标定是高动态范围成像技术的关键步骤,能够获得真实场景的辐照度与获得图像像素值之间的映射关系,从而通过该映射关系获得拍摄的真实场景的高动态范围图像。文章对目前现有的相机响应函数标定算法进行分类总结,可为相机响应函数标定算法的研究思路与方法提供借鉴。

关键词:相机响应函数;高动态范围成像;静态场景;动态场景

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.01.003

Research progress of camera response function calibration

DU Lin, SUN Hua-yan, LI Ying-chun, XU Tao-hu
(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract:High dynamic range imaging technique can avoid the influence of shooting direction such as backlight or the different exposures, which makes for high quality imaging under the complex environment, so it is widely used in pattern recognition, intelligent transportation system, remote sensing, military surveillance and other research fields and has important research value. Camera response function calibration is the key of the high dynamic range imaging, and it can establish the mapping between real scene irradiance and image pixel values. High dynamic range image of real scene can be acquired by the mapping. The existing camera response function calibration algorithms are classified and summarized, the development direction is put forward, which provides references for the further research.

Key words:camera response function; high dynamic range imaging; static scene; dynamic scene

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和色差影响真实场景的信息采集^[1],有利于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、深空探测、视频监控跟踪、机器人视觉导航、工业检测、遥感遥测、军事监视侦察以及武器导航制导等众多领域,具有重要的研究价值。而相机响应

函数的标定是高动态范围图像处理的关键技术。

相机响应函数(camera response function, CRF)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,用于表示采集图像像素值与真实场景辐照度之间的映射关系。相机响应函数具有固定不变性、非线性、光滑连续性以及单调递增的性质^[2]。通常通过光学系统获得的图像亮度可以表示为^[3]: $M = g(I)$, M 为图像亮度, g 为响应函数, I

为场景的辐射度。假设响应函数是单调的,则存在逆函数 f 使得 $I=f(M)$ 。由多帧不同曝光量图像合成高动态范围图像的关键是要计算出相机响应函数的逆函数 f 。

相机响应函数标定算法发展流程如图 1 所示。

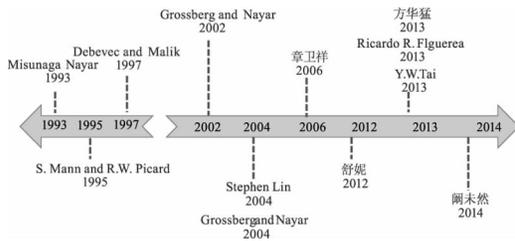


图 1 相机响应函数标定算法发展历程

Fig. 1 The development history of camera response function calibration

2 基于静态场景多曝光图像的相机响应函数标定算法

目前大多相机响应函数标定算法是利用针对静态场景拍摄的多曝光图像序列进行相机响应函数标定,从而获得拍摄场景与图像像素值之间的映射关系。

2.1 基于多项式拟合的相机响应函数标定算法

Mitsunaga 和 Nayar^[4]利用多项式近似描述相机响应曲线,任何响应函数均可用高阶的多项式进行描述,定义 N 维多项式表述相机响应方程如式(1)所示:

$$I = f(M) = \sum_{n=0}^N c_n M^n \quad (1)$$

式中, N 为多项式的阶; c_n 为多项式 n 次项的系数。相机响应函数即是求解 N 和 c_n 的过程。最终的响应函数是通过多项式中的 $(N+1)$ 个参数 $\{c_0, \dots, c_n\}$ 确定的。精确的曝光度比可以通过迭代约束求得。

该方法需要提前输入图像间曝光度比的粗略估计值,并通过迭代以求得相机响应函数和精确的估计值。优势在于只需要利用曝光度比的粗略估计值即可拟合相机响应函数,但算法稳健性不好,当迭代结束条件精度设置较高时容易发散,而且当曝光度比的估计值偏离正确值稍大时会发散或收敛到错误的结果。

基于多项式的响应函数标定算法明显的优势在于能够获得相机响应方程的同时准确地求解曝光比例。从而降低了对成像设备的要求,不需要准确的光圈与快门速度信息。

2.2 基于交叉直方图的相机响应函数标定算法

S. Mann 和 R. W. Picard 于 1995 年^[5]对相机的

响应函数做出了严格的限定,其模型可以表示为:

$$Z = f(X) = \alpha + \beta X^\gamma \quad (2)$$

这种映射关系可以通过对拍摄的两张图建立一个交叉的直方图来获得,该交叉直方图是一个 256×256 平面线图, X 轴表示第一张图的 256 个像素亮度级别, Y 轴表示第二张图中的 256 个亮度像素级别。在这个 256×256 的平面图中,一个点代表的是第一张图的像素亮度 x 与第二张图中的像素亮度值 y 的对应关系。在得到交叉直方图之后,可以通过回归的方法来获得该点的映射关系,公式(2)中的 β 和 γ 也可以被估算出来。

2.3 基于最小二乘的相机响应函数标定算法

Debevec and Malik 于 1997^[6]年提出的相机响应函数标定算法是较为经典的算法,目前很多相机响应函数标定算法是在此基础上进行改进的。该算法所需要的图像是多帧针对同一场景已知不同曝光时间的序列图像。假设场景是静态的并且忽略光照变化,针对各帧图像进行采样点筛选以满足约束条件,进而利用奇异值分解法求解最小二乘法建立的超定方程,从而获得拍摄场景辐照度与图像亮度之间的映射关系即相机响应函数。

彩色图像需对 R、G、B 三路通道分别计算相机响应 CRF 曲线,从而获得各路通道像素值与相应辐照度之间的映射。此算法适用于已知精确的曝光度而且图像噪声较小的情况。

2.4 改进的静态场景序列图像的相机响应函数标定算法

M. D. Grossberg 和 S. K. Nayar 于 2002 年提出基于直方图取样的相机响应函数标定算法^[7],该算法通过匹配直方图百分位数(percentiles)而不是图像的位置来获得相机响应方程。基于直方图的算法不对优先曝光的配准区域进行处理,并且避免了场景和相机的晃动给相机响应曲线拟合带来的影响。该算法可与之前的算法如 Mitsunaga-Nayar、Debevec-Malik 等人提出的算法的衍生算法相结合。

M. D. Grossberg 和 S. K. Nayar 于 2004 年^[8]分析了相机响应函数的共同特征以及必须满足的约束条件,从而获得相机响应函数的理论空间。利用已经得到的实际的不同的相机响应函数建立的数据库(DoRF),结合理论空间的相机响应函数约束条件,建立一个低参数的经验响应函数标定模型(EMoR)。该响应模型能够实现利用少量的采样数据进行准确的相机响应函数的标定。

章卫祥等人^[9]于 2006 年在 Mitsunaga 和 Nayar

提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利用多帧不同曝光度的图像来标定相机响应函数。该算法可以自动估计并最后求得精确的曝光度比,省略了原有算法需要输入曝光度比估计值的步骤。与 Mitsunaga 和 Nayar 的原有算法相比,该算法的稳健性得到很大提高。

舒妮等人于 2012 年^[10]根据图像序列成像特点对图像序列去噪;充分利用每幅图像的像素信息,采用最小二乘法分别拟合出图像序列与第一幅图像像素值的关系曲线;进而利用该曲线进行相机响应曲线拟合。该算法减少了对图像序列采样的过程,避免了拟合出的相机响应曲线随采样点变化,曲线变化大、不稳定的问题。该算法通常选取整体亮度较低,但像素值基本覆盖 0 ~ 255 中所有像素值的图像作为拟合相机响应函数的第一帧图像。

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,武汉大学方华猛等人^[11]于 2013 年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,从而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声分布,引入高斯加权函数,从而有效减少多曝光图像在高亮或过暗区域成像过程中引入的噪声,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,得到能够表现整个场景亮区和暗区细节信息的可视化图像。

3 基于单幅图像的相机响应函数标定算法

目前大部分相机响应函数标定算法是利用多幅曝光序列图像求取该相机响应函数,计算效率低耗时长且不适用于实时应用。Stephen Lin 等人^[12]于 2004 年提出通过单幅图像找到像素值与真实场景辐射度值对应的相机响应关系曲线。该方法通过在一幅图像上估计颜色边缘的 RGB 分布实现,自动选择适当的边缘信息,使用贝叶斯定理计算曲线。

该算法计算效率高,能够准确地对成像系统的相机响应函数进行标定,但对采样区域选择的约束条件较高,采样区域的选择对标定精度影响较大。

4 基于动态场景的相机响应函数标定算法

Y. W. Tai 等人于 2013 年^[13]提出利用已知的或未知的点扩散函数进行相机响应函数估计的算法。利用图像边缘投影的形状进行相机响应函数的估计,当点扩散函数未知的情况下利用秩最小化进行鲁棒性估计,但该算法对模糊轮廓选取合适与否较为敏感,限制了该算法的应用。如果单帧的模糊图像无法提供足够的估计相机响应函数的边缘信息,可以利用序列多帧图像进行边缘轮廓信息提取,进而估计相机响应函数。

当拍摄的运动目标图像中存在较为明显的模糊现象时需要首先对采集图像进行去模糊处理,对后续相机响应函数的标定会存在影响。阚未然等人^[14]研究基于单幅运动模糊图像的相机响应函数标定算法,给出运动模糊模型与相机响应函数结合的模糊模型,该模型能够准确描述实际运动模糊图像的形成过程,并且在该模型的基础上提出一种灵活选取边界求解相机响应函数的算法。

目前针对动态场景动态目标的相机响应函数标定算法精度有限,仍需进一步针对如何提取运动目标特征^[15]与相机响应函数特征进行深入研究。

5 结论

基于相机响应函数的高动态范围图像融合算法能够通过相机响应函数的标定建立采集图像像素值与拍摄真实场景辐照度之间的映射关系,从而获得真实场景的辐照度图像,对后续的应用研究具有重要的意义,而相机响应函数的准确标定即是该算法的关键技术。针对彩色图像分为 R、G、B 三个色彩通道标定的相机响应曲线应均是单调递增并保持一致的,否则将造成曲线对应值较高颜色的色偏。目前已有的各种相机响应函数标定的算法复杂,计算量大,从而增加的相机响应函数标定的时间开销。拍摄图像序列之间的配准精度与混叠效应去除的效果对传统基于图像序列的相机响应函数标定算法有很大的影响,且需要拍摄信息较为丰富的场景进行标定,而实际条件可能是场景较为单一的环境。所以在未来的工作中适应于各类场景、基于单幅图像的快速相机响应函数标定算法具有重要的研究价值。

参考文献:

- [1] S Mann, R Mann. Quantigraphic imaging: estimating the camera response and exposures from differently exposed images [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2001:842 - 849.

- [2] E Reinhard, G Ward, S Pattanaik, et al. High dynamic range imaging: acquisition, display and Image-based Lighting [M]. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufman, 2010.
- [3] T Mitsunaga, S K Nayar. 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.
- [4] T Mitsunaga, S K Nayar. Radiometric self calibration [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1993: 374 – 380.
- [5] S Mann, R W Picard. On being ‘undigital’ with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures [C]. IS&T’s 48th Annual Conference, 1995: 422 – 428.
- [6] P E Debevec, J Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. SIGGRAPH 97 Conf. Proc., Computer Graphics Annual Conf. Series, 1997: 369 – 378.
- [7] M D Grossberg, S K Nayar. What can be known about the radiometric response from images [C]. Proc. Euro. Conf. on Comp, 2002: 189 – 205.
- [8] M D Grossberg, S K Nayar. Modeling the space of camera response functions [C]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 10(26): 1272 – 1282.
- [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. (in Chinese)
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] SHU Ni, CHEN Xiaowei. New method of recovering response curve in process of HDRI constructing [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 1032 – 1036. (in Chinese)
舒妮, 陈孝威. HDRI 合成中新的相机响应曲线算法 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 1032 – 1036.
- [11] 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. (in Chinese)
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, 43(6): 737 – 741.
- [12] S Lin, J Gu, S Yamazaki. Radiometric calibration from a single image [C] // Proceedings of the 2004 IEEE Society Conference on Computer Visual and Pattern Recognition, IEEE, 2004, 2: 938 – 945.
- [13] Y W Tai, S Y Kim, J Yang, 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.
- [14] KAN Weiran, FANG Xianyong. Camera response function estimation method for motion blurred image [J]. Computer Engineering, 2014, 10(40): 232 – 238. (in Chinese)
阚未然, 方贤勇. 运动模糊图像的摄像机响应函数估计方法 [J]. 计算机工程, 2014, 10(40): 232 – 238.
- [15] ZHENG Jia, LI Jiangyong. Moving target detection based on background difference information entropy [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5): 563 – 566. (in Chinese)
郑佳, 李江勇. 基于背景差分和信息熵的运动目标检测算法 [J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 563 – 566.