

基于多曝光图像序列的相机响应函数标定方法

高刘正^{1,2}, 关棒磊^{1*}, 苏昂^{1**}, 李璋¹, 于起峰¹¹国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410072;²酒泉卫星发射中心, 甘肃酒泉 735000

摘要 基于多项式拟合的标定方法可在缺乏相机曝光时间的条件下, 获取相机响应函数(CRF)曲线和图像曝光比, 具备广泛的适用性。然而该方法存在迭代发散和标定精度不高问题, 影响其实际应用。本文通过分析传统多项式拟合标定方法流程, 发现在全局误差函数条件下, 标定数据集中存在大量无效项, 既减少了有效标定数据, 又降低了图像曝光比迭代计算精度。针对这一问题, 提出了一种改进的联合局部误差函数标定方法, 可在两幅曝光相近的图像间选取标定数据, 避免引入无效项, 使得计算多项式系数和曝光比的数据一致。在公开数据集和某工业相机拍摄数据集上的标定结果表明, 改进方法具有较好的收敛性, 相比于传统方法, 颜色三通道 CRF 曲线分布更加紧凑, 通道间曝光比平均偏差分别减少了 49.83% 和 42.25%。

关键词 成像系统; 相机响应函数; 多曝光图像; 拟合多项式

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231687

1 引言

相机响应函数(CRF)能够建立相机拍摄的图像像素值与场景实际辐射亮度之间的映射关系, 是高动态融合成像^[1]和高动态图像测量^[2-3]的关键技术, 可应用于室外成像^[4]、高温焊接^[5]、遥感遥测^[6], 以及航空航天^[7-8]等众多领域, 具有重要的实用价值。目前 CRF 标定方法主要包括直接测量方法和图像反演方法。直接测量方法^[9]需要高精度的测量设备, 同时测定场景辐射度和相机输出图像像素值, 通过拟合测量数据得到 CRF 曲线。该方法通常在实验室内进行, 对标定设备要求较高, 因而适用场景有限。图像反演方法则无需测量场景辐射亮度值, 而是通过设定场景辐射度规则和场景图像, 依据图像像素值反演出 CRF。对于单幅图像的 CRF 标定^[10], 通常选取图像颜色边缘上的有效信息构建观察集, 利用 DoRF 数据库^[11]和贝叶斯估计迭代优化。该方法能够获取较为准确的 CRF, 但是构造观察集需要人工辅助, 不能自动实现。对于多幅图像的 CRF 标定, 需要设定图像序列照度一致原则, 据此确定不同曝光图像相同位置像素间的函数关系。Debevec 等^[12]构建出场景光照通过光学系统传递到探测器形成图像的关系方程, 根据此关系方程和相机曝光时间构建方程组解算出 CRF。该方法不仅需要相机提供准确曝光时间, 而且需要设定平滑因子数值, 如

果平滑因子太小, 曲线通常不满足单调性; 反之太大, 曲线会平滑过度偏离实际值。Mitsunaga 等^[13]通过对已知 CRF 的分析, 提出了一种多项式拟合方法, 该方法不需要相机提供曝光时间, 因而具有更为广泛的适用性, 但是也存在着迭代发散问题。章卫祥等^[14]对该方法进行了改进, 设定了过零点和初始曝光比的条件, 使得迭代发散问题得到改善, 但是多项式拟合结果仍然存在不稳定的问题。

针对工业相机无法提供曝光时间的条件和需要图像间曝光比计算场景动态范围的需求, 本文对适用性最广的多项式拟合 CRF 标定方法进行了研究。首先发现了传统方法在数据选择方面存在的问题, 然后针对无效数据过多的情况, 将全局误差函数改为局部误差函数, 从而能够最大化地使用图像原始数据, 得到收敛性和准确性较好的 CRF 和图像曝光比。改进方法不依赖实验室条件, 能够现场标定, 可为工业相机在高动态图像融合和图像测量领域提供更广阔的应用(改进标定方法代码见 https://github.com/GuanBanglei/CRF_Calibration)。

2 传统多项式拟合方法及存在的问题

2.1 传统多项式拟合方法

相机响应函数表示了实际场景光照经过光学成像系统达到探测器, 然后经过数字信号采样量化和压缩

收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2023-12-05; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(12372189)、湖南省自然科学基金(2023JJ20045)、研究基金项目(GJSD22006, KY0505072204)

通信作者: *banglei.guan@hotmail.com; **suang2008@126.com

变换形成像素值的过程。具有固有性、非线性、单调性和光滑连续的特点。对于理想成像系统,探测器表面的辐射度 I 与场景的辐射度 L 存在以下线性关系:

$$I = L \times k \times e, \quad (1)$$

式中: $k = \cos^4 \varphi / h^2$; $e = \pi \times d^2 \times t / 4$, 其中 φ 为光线和光轴所成的角度, h 为镜头焦距, d 为光圈的直径, t 为曝光时间。对于定焦光学系统, k 通常不变, e 为图像曝光量, 可以通过调节光圈 d 和曝光时间 t 来控制到达探测器表面的辐射强度。

探测器表面辐射度 I 经过信号处理电路后变为图像像素值 M , 通常为非线性变换。进一步地, Mitsunaga 等^[13]通过分析相机生产商提供的 CRF, 得出可以通过一个高阶多项式拟合 CRF 的结论。那么表面辐射度 I 与图像像素值 M 的关系可表示为

$$I = f(M) = \sum_{n=0}^N c_n M^n, \quad (2)$$

式中: $f(*)$ 为由图像像素值到场景辐射度变换的 CRF; N 为多项式的阶数; c_n 为多项式 n 次项的系数。CRF 的标定可以转变为求解多项式的阶数 N 和多项式的系数 c_n 。

为了求解拟合多项式, 需要定义不同亮度图像间的曝光比 $R_{q,q+1} = e_q / e_{q+1}$, 其中 q 表示曝光等级。由于图像的相同位置 p 处辐射度 I 相同, 那么两张图像对应位置处的辐射度 $I_{p,q}$ (p 表示位置, q 表示曝光等级) 之比可以表示为

$$\frac{I_{p,q}}{I_{p,q+1}} = \frac{L_p \times k_p \times e_q}{L_p \times k_p \times e_{q+1}} = R_{q,q+1} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)后, 可以得到不同曝光图像间相同位置处像素值的多项式关系, 表示为

$$\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n = R_{q,q+1} \times \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n \quad (4)$$

那么 CRF 可以通过式(4)的误差函数来迭代求解, 误差函数可表示为

$$\epsilon = \sum_{q=1}^Q \sum_{p=1}^P \left(\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n - R_{q,q+1} \times \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n \right)^2, \quad (5)$$

式(5)即为全局误差函数。根据 Mitsunaga 等^[13]和章卫祥等^[14]的设定, 首先按照图像亮度由小到大排列图像, 使得曝光比 $R_{q,q+1} < 1$, 然后将像素值 M 变换到 $[0, 1]$ 区间, 设定 $f(0) = 0$ 和 $f(1) = 1$ 的附加条件, 初始曝光比可使用图像像素平均值之比代替。下面进入迭代优化循环。

CRF 多项式的系数可以通过下面的式子导出的线性方程组求解得到:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial c_n} = 0. \quad (6)$$

得到当前迭代次数 k 条件下的多项式系数 $c_n^{(k)}$ 后, 进一步可以计算出下一次迭代条件下的图像曝光比 $R_{q,q+1}^{(k+1)}$, 可表示为

$$R_{q,q+1}^{(k+1)} = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{n=0}^N c_n^{(k)} M_{p,q}^n}{\sum_{p=1}^P \sum_{n=0}^N c_n^{(k)} M_{p,q+1}^n} \quad (7)$$

将式(7)代入到式(6)中可以循环迭代, 直到循环满足最大迭代次数或者下面的误差判定条件:

$$|f^{(k+1)}(M) - f^{(k)}(M)| < \delta, \forall M, \quad (8)$$

式中, δ 是一个小量。该多项式拟合算法无确定最大阶数 N 的条件, 实际运算中可取经验值或者依次取值求解, 使得 CRF 曲线最优。对于彩色图像, 认为颜色三通道红、绿、蓝 (R、G、B) 相互独立, 分别标定其 CRF。

2.2 标定数据存在的问题

为了求解全局误差函数式(5), 需要选取同一位置所有图像曝光等级的图像像素值, 而由于图像曝光等级的差异, 同一位置处仅有部分曝光等级的像素在有效区间范围以内, 其余曝光等级的像素值不在有效区间之内, 无法参与标定。常用的标定数据集选择方法包括 Grossberg 方法^[11]、常规间隔选择方法 (Regular) 和随机坐标选择方法 (Random)。Grossberg 方法通过统计直方图, 选择特性相同的像素集合; 常规间隔选择方法是按照图像坐标系的固定间隔选择像素集合; 随机坐标选择方法则是随机选择图像坐标构建像素值集合。

以 Office 公开数据集为例, 说明标定数据存在的问题。Office 数据集如图 1 所示, 共包含 6 幅不同曝光等级的图像。使用上述三种数据选择方法形成的 R 通道部分数据如表 1 所示, 其中有效区间定义为 $[20, 235]$, 表格中数据区域的空余项表示像素值未处于有效数据区间。

通过表 1 可以看出, 数据区域存在大量的空余项, 表明该曝光等级下的图像数据无效, 这导致了曝光等级间有效数据数目不一致。缺失的数据项不会影响全局误差函数式(5)的计算, 但是会影响迭代过程中曝光比的计算。式(7)中需要计算相邻曝光等级间对应位置像素点响应函数的比值, 缺失项使得匹配点数较少, 即用于计算式(7)的数据组合与用于计算式(6)的数据组合不一致。以常规间隔选择方法前两行数据为例, 计算式(6)可以选择 $\{0, 0, 0, 36, 91, 194\}$ 和 $\{0, 0, 31, 87, 189, 0\}$ 两组集合, 而计算式(7)中的 $R_{3,4}$ 只能选择一组数据 $\{31, 87\}$, 用于计算曝光比的组合数少于用于计算多项式系数的组合数。如果数据集中有效数据一致, 则可利用两组数据计算曝光比。这些标定数据的缺失会使得曝光比误差变大, 进而影响标定迭代过程的稳定性和迭代结果的准确性。

3 改进的相机响应函数标定方法

针对全局误差函数在数据选择存在的问题, 对式(5)进行了改进, 将全局误差函数改为局部误差函数, 将全部曝光等级图像间的误差之和修改为相邻曝光等

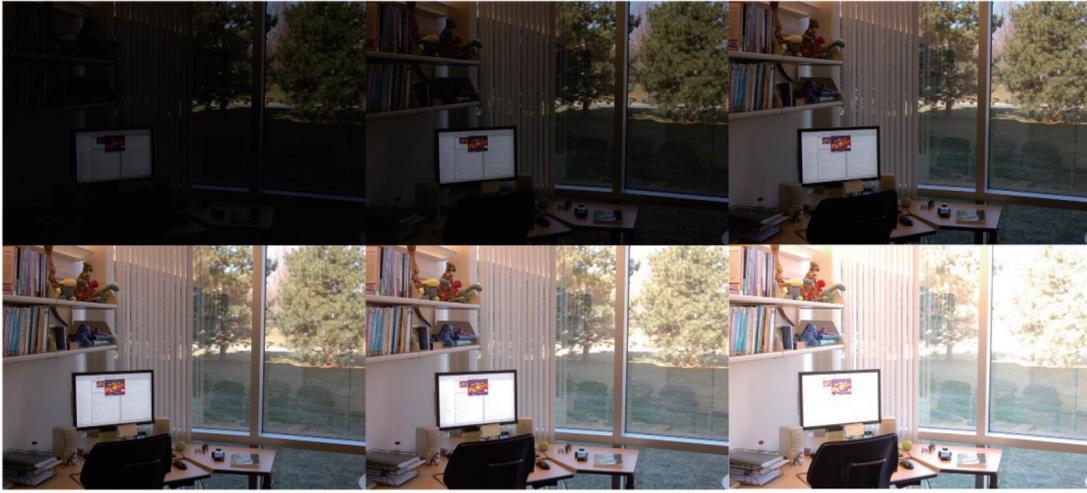


图1 Office 公开数据集

Fig. 1 Public data set of Office

表1 三种数据选择方法形成的部分标定数据集

Table 1 Partial calibration data sets resulting from three data selection methods

Regular						Grossberg						Random					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
—	—	—	36	91	194	—	—	—	—	24	81	—	—	—	36	117	219
—	—	31	87	189	—	—	—	—	—	25	83	—	32	102	217	—	—
—	—	—	28	89	185	—	—	—	21	71	171	—	83	178	—	—	—
—	—	22	77	177	—	—	—	—	21	72	173	—	—	85	136	228	—
—	—	—	22	79	181	—	—	21	71	169	—	—	—	61	158	—	—
—	—	—	27	101	201	—	21	70	172	—	—	—	—	54	146	—	—
—	—	25	89	189	—	23	109	209	—	—	—	—	—	66	167	—	—
—	—	—	39	125	216	33	139	232	—	—	—	—	29	89	186	—	—

级间两幅图像的误差。为了保持全局最优化,将所有局部误差联立,求解全局误差的最小值转变为求解所有局部误差的最小值。局部误差函数表示为

$$\epsilon_{q,q+1} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n - R_{q,q+1} \cdot \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n \right)^2, \quad (9)$$

式中: $\epsilon_{q,q+1}$ 为第 q 级曝光与第 $q+1$ 级曝光之间的误差; P 为标定数据总数。那么在标定数据选择方面,只需要选择两幅图像间的有效数据,避免选择超出有效范围的其他曝光等级图像的像素值。另外,在标定数据选择、初始曝光比和迭代条件方面也相应进行了改进。

标定数据选择。探测器采集处理电路中通常存在暗电流、热噪声和读取噪声等^[15],因此在图像的低亮度区域,像素值信噪比较低,影响标定方程的准确性,因此需要确定有效数据下限;在图像的高亮度区域,像素值趋于饱和,该区域的单个像素值可对应于低一级曝光图像中较大的像素取值范围,导致标定结果差异较大,因此需要确定有效数据上限。本文选择数据的有效区间为 $[20, 230]$ 。此外为了保证数据选择的规整性,优先选择平坦区域的像素。

初始曝光比。传统方法中初始曝光比设定为整幅图像像素平均值的比值,由于图像中含有大量的噪声干扰像素,本文将初始曝光比设定为数据集中中像素平均值的比值。

迭代条件。由于将全局误差函数变为局部误差函数,因此迭代求解多项式系数的式(6)也要进行相应的修改。需要将每个曝光等级的误差函数求导,然后联立方程组,可表示为

$$\frac{\partial \epsilon_{q,q+1}}{\partial c_{n_i}} = 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q-1. \quad (10)$$

将式(10)展开,可表示为

$$\sum_{p=1}^P \left(\sum_{n=0}^N c_n M_{p,q}^n - R_{q,q+1} \cdot \sum_{n=0}^N c_n M_{p,q+1}^n \right) \cdot \left(M_{p,q}^{n_i} - R_{q,q+1} M_{p,q+1}^{n_i} \right) = 0, \quad (11)$$

式中: n_i 表示求导多项式系数表示的次数,其取值范围为 $[1, 2, \dots, N]$;曝光等级 q 的取值范围为 $[1, 2, \dots, Q-1]$ 。相比于传统方法,改进方法增加了 $(Q-2) \times N$ 个方程,在求解迭代参数时,联立这些方程,保证全局最优。迭代结束条件方面,与传统方法保持一致。

使用改进的标定方法对 Office 数据集进行了标定,部分标定数据集合如表 2 所示,可以看出,相邻曝

光等级间的标定数据能够一一对应,计算优化函数与计算曝光比的数据保持一致。

表 2 改进标定方法选取的数据集合
Table 2 Selected data sets for improved calibration method

Adjacent exposure level									
1-2		2-3		3-4		4-5		5-6	
53	101	33	77	64	97	101	147	145	226
21	64	27	69	66	99	96	143	139	229
42	93	43	92	67	102	110	157	97	173
55	107	38	84	85	128	146	191	137	224
51	103	106	178	92	133	67	99	84	160
46	96	37	78	42	76	181	225	123	201
20	53	48	100	92	136	54	85	96	172
22	65	63	118	169	212	62	93	54	107

改进方法的 CRF 标定结果与传统方法的标定结果,如图 2 所示。比较传统方法标定结果和改进方法标定结果,可以看出 R、G、B 三通道 CRF 曲线具有较

好的一致性,尤其是在低像素区间,曲线的发散范围减小。不同曝光等级图像间的曝光比如表 3 所示,可以看出改进方法曝光比的偏差变小。

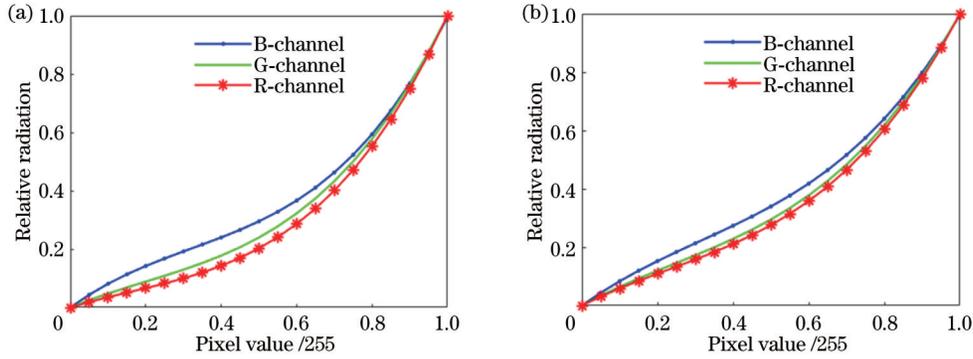


图 2 Office 数据集 CRF 标定结果。(a)传统标定方法;(b)改进标定方法

Fig. 2 CRF calibration results for Office data set. (a) Traditional calibration method; (b) improved calibration method

表 3 Office 数据集不同曝光等级图像间的曝光比

Table 3 Exposure ratio between images of different exposure levels for Office data set

Method	Channel	Exposure ratio				
		1/2	2/3	3/4	4/5	5/6
Traditional method	B-channel	0.3194	0.3568	0.6374	0.6684	0.5174
	G-channel	0.2652	0.3576	0.6115	0.6130	0.4455
	R-channel	0.1688	0.3066	0.5618	0.5549	0.4098
Improved method	B-channel	0.4953	0.5344	0.6804	0.6840	0.5119
	G-channel	0.4734	0.4933	0.6488	0.6553	0.5319
	R-channel	0.4455	0.4741	0.6247	0.6386	0.4931

4 工业相机标定实验

为了进一步验证改进的标定方法的有效性,使用大恒工业相机(型号为 MER2-503-36U3C,传感器为 Sony IMX264 CMOS)拍摄高动态场景,通过不同曝光图像组来计算相机的 CRF。图像组命名为 Window 数据集,如图 3 所示,共有 6 幅不同曝光图像,低曝光图像中可以清晰显示室外场景(公园模型),高曝光图像

中可以清晰显示室内场景(窗帘和墙面)。使用三脚架固定拍摄,镜头焦距固定为 5 mm。由于相机设定的曝光时间不是准确值,设定的曝光参数与真实曝光参数存在差异,为了方便采集图像,采用倍增方法来获取不同曝光图像,这样相邻曝光等级图像间的曝光比在 0.5 左右。

使用传统多项式拟合方法和改进方法分别对 Window 数据集进行标定,得到的标定结果如图 4 所

示。从图 4 中可以看出,三通道曲线在传统方法中较为发散,在改进方法中则较为紧凑。相邻曝光等级间

的图像曝光比如表 4 所示,可以看出,改进方法曝光比的一致性有了明显提升。



图 3 使用大恒工业相机拍摄的 Window 数据集

Fig. 3 Window data set taken with Daheng industrial camera

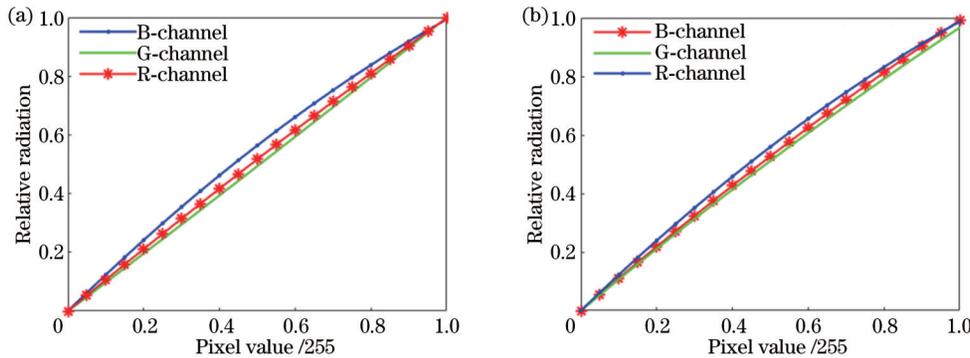


图 4 Window 数据集 CRF 标定结果。(a)传统标定方法;(b)改进标定方法

Fig. 4 CRF calibration results for Window data set. (a) Traditional calibration method; (b) improved calibration method

表 4 Window 数据集不同曝光等级图像间的曝光比

Table 4 Exposure ratio between images of different exposure levels for Window data set

Method	Channel	Exposure ratio				
		1/2	2/3	3/4	4/5	5/6
Traditonal method	B-channel	0.6013	0.5420	0.5360	0.5260	0.5417
	G-channel	0.4818	0.4670	0.4898	0.4923	0.4930
	R-channel	0.5339	0.4952	0.5187	0.5066	0.5054
Improved method	B-channel	0.5510	0.5329	0.5470	0.5429	0.5327
	G-channel	0.5176	0.4996	0.5117	0.5021	0.4889
	R-channel	0.5218	0.5100	0.5181	0.5106	0.5104

5 分析和讨论

5.1 改进方法标定精度提升

通过图 2 和图 4 中传统方法和改进方法 CRF 曲线

分布可以看出,改进标定方法三个颜色通道的曲线一致性更好,在低亮度区间的分散区间更小。通过表 3 和表 4 中不同曝光等级图像间的曝光比值也能表明改进方法的精度提升。两组标定数据中,传统方法不同

颜色通道间曝光比的最大差值分别为 0.1506 和 0.1195, 平均差值分别为 0.0664 和 0.0431; 而改进方法不同颜色通道间曝光比的最大差值分别为 0.0603 和 0.0438, 平均差值分别为 0.0333 和 0.0249。相比于传统方法, 改进方法不同颜色通道间曝光比的最大差值分别减小了 59.96% 和 63.35%, 平均差值分别减小了 49.83% 和 42.25%。由此可见, 改进方法较传统方法在 CRF 标定精度和曝光比计算精度方面均有显著提升。

5.2 标定 CRF 颜色曲线分布的合理性

观察图 2 中传统标定方法和改进标定方法三个颜色通道分布曲线可以发现, 对于相同的像素值, B 通道对应的相对辐射量最高, G 通道次之, R 通道最小。该曲线分布可以利用探测器对不同光谱的量子吸收率来解释。以 Sony IMX265 彩色 CMOS 图像传感器为例^[16], 其颜色三通道相对量子吸收率随波长的变化曲线如图 5 所示。在可见光波长区间 [400, 700], B 通道曲线包络面积最小, G 通道和 R 通道包络面积相当, 而硅基底探测器的吸收波长范围会超过 700 nm, 甚至到 950 nm, R 通道的包络面积将大于 G 通道的包络面积。假设采集随波长能量均匀分布的环境光, B 通道形成的像素值最小, G 通道像素值大于 B 通道像素, R 通道像素值最大; 也即相同的像素值, B 通道表示辐射量最大, G 通道次之, R 通道最小, 表明了图 2 曲线分布的合理性。图 4 传统方法和改进方法标定曲线中, 相同像素值条件下, B 通道表示辐射量最大, G 通道和 R 通道较小, 但是受制于镜头工作波长 (常见镜头的工作波长为 360~780 nm), G 通道略小于 R 通道, 也表明了图 4 标定曲线分布的合理性。

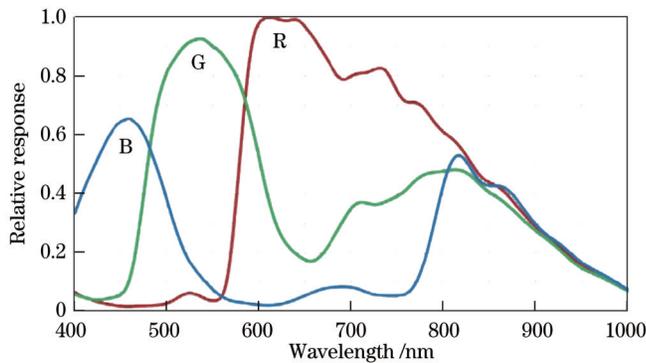


图 5 Sony IMX265 彩色 CMOS 三颜色通道相对量子吸收率随波长的变化图

Fig. 5 Relative quantum absorptivity versus wavelength for three color channels of Sony IMX265 color CMOS

5.3 改进标定方法的收敛性

实验发现, CRF 标定过程的收敛性与拟合多项式的最高阶数相关, 超过一定值后, 多项式的最高阶数越大, 收敛性越差。通过编写实时标定过程显示软件进行标定实验发现, 多项式最高阶数应不大于标定图像

数目, 且优先选择奇数, 偶数阶数的收敛性低于奇数阶数。本文标定 Office 数据集选择的最高阶数为 3, 对最高阶数 4、5、6 也进行了检验, 发现阶数 4 和 6 无法收敛, 阶数 5 可以收敛, 但是 B 通道和 R 通道存在明显的过拟合现象, 如图 6 所示, 因此选取低于 5 的最高阶数即可满足标定需求。文献 [17] 中的标定结果也同样存在过拟合现象, 与图 6 中的曲线相似。在这种情况下, CRF 和图像曝光比计算值与实际偏差较大。因此建议, 标定最高阶数应选择不大于标定图像数的奇数, 然后再在这些奇数阶数中选择最优标定结果。

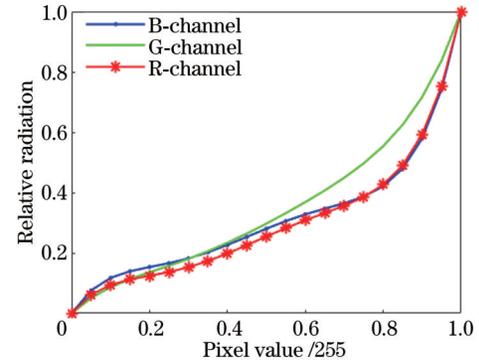


图 6 最高阶数为 5 时标定的 CRF
Fig. 6 CRF calibrated at highest order of 5

6 结 论

本文提出的改进多项式拟合 CRF 标定方法能够解决传统标定方法存在的求解迭代多项式系数和曝光比数据集不一致的问题, 提升了 CRF 标定精度和图像曝光比计算精度。在公开数据集和工业相机拍摄数据集上的标定结果表明, 不同颜色通道间曝光比的最大偏差分别减小了 59.96% 和 63.35%, 平均偏差分别减小了 49.83% 和 42.25%。通过对彩色相机三通道光谱量子吸收效率的分析, 论证了 CRF 曲线分布的合理性。最后讨论了拟合多项式的最高阶数和 CRF 标定曲线的收敛性的关系, 最高阶数应优先选择不大于图像数目的奇数, 方便了该方法的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Tocci M D, Kiser C, Tocci N, et al. A versatile HDR video production system[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 41.
- [2] Li J, Guan J T, Wang Y K, et al. Accurate estimation of camera response function for high dynamic range measurement[J]. Applied Optics, 2022, 61(1): 167-176.
- [3] 李乾, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 利用相机响应曲线实现高光元件三维面形测量[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712001.
Li Q, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three dimensional shape measurement of high reflective elements using camera response curve[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712001.
- [4] Yang D, Zhang S Q, Wang S, et al. Real-time illumination adjustment for video deflectometers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(5): e2930.

- [5] 蔡旺, 蒋平, 舒乐时, 等. 基于机器视觉的高功率激光焊接过程飞溅监测方法与飞溅特征研究[J]. 中国激光, 2023, 50(24): 2402106.
Cai W, Jiang P, Shu L S, et al. Machine vision-based spatter monitoring method and spatter characterization for high power laser welding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(24): 2402106.
- [6] 王保华, 张绪国, 封宇航, 等. 可见光/红外共口径模块化光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0122001.
Wang B H, Zhang X G, Feng Y H, et al. Design of visible/infrared common-aperture modular optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0122001.
- [7] 段鹏程, 程博, 管今哥, 等. 基于多 CCD 同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20220352.
Duan P C, Cheng B, Guan J G, et al. Three-dimensional radiation thermometry for dynamic combustion field based on multi-CCD synchronous coupling (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 20220352.
- [8] Gao L Z, Guan B L, Li Z, et al. Two large-exposure-ratio image fusion by improved morphological segmentation[J]. Applied Optics, 2023, 62(29): 7713-7720.
- [9] Chang S H, Wu H H P. Improved measurement of camera response function and its performance evaluation[J]. Applied Optics, 2014, 53(1): 82-89.
- [10] 都琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于单帧图像的相机响应函数标定算法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0711003.
Du L, Sun H Y, Zhang T H, et al. Camera response function calibration algorithm based on single frame image[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0711003.
- [11] 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.
- [12] 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-SIGGRAPH '97, August 3-8, 1997, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 1997: 369-378.
- [13] Mitsunaga T, Nayar S K. Radiometric self calibration[C]//Proceedings of 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), June 23-25, 1999, Fort Collins, CO, USA. New York: IEEE Press, 2002: 374-380.
- [14] 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): 4658-4663.
Zhang W X, Zhou B F. A robust HDR image calibration algorithm for camera response function[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(4): 4658-4663.
- [15] Matsushita Y, Lin S. Radiometric calibration from noise distributions[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007.
- [16] MER2-503-36U3MC-Datasheet[EB/OL]. (2022-09-30) [2023-10-23]. <https://www.daheng-imaging.com/product/area-scan-cameras/daheng/mer2-u3/>.
- [17] 都琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于 PCA 的相机响应函数模型标定算法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1026001.
Du L, Sun H Y, Zhang T H, et al. Calibration camera response function model algorithm based on principal component analysis [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1026001.

Calibration Method of Camera Response Function Based on Multi-Exposure Image Sequence

Gao Liuzheng^{1,2}, Guan Banglei^{1*}, Su Ang^{1**}, Li Zhang¹, Yu Qifeng¹

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, Hunan, China;

²Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735000, Gansu, China

Abstract

Objective The calibration method based on polynomial fitting can obtain the camera response function (CRF) curve and image exposure ratio under the lack of camera exposure time, and has wide applicability. However, the method has the problems of iterative dispersion and low calibration accuracy, thus affecting its practical applications. We analyze the flow of the traditional polynomial fitting calibration methods and find that the calibration data set contains a large amount of invalid data under the global error function, which not only reduces the quantity of effective calibration data but also causes inaccurate iterative image exposure ratio parameters. To this end, we propose an improved joint local error function calibration method, which can select the calibration data between two images with similar exposures to avoid the introduction of invalid terms and make the data for calculating the polynomial coefficients and exposure ratios consistent. The calibration results of the public data set and an industrial camera show that the improved method has better convergence, the color three-channel CRF curves are more compactly distributed than that of the traditional methods, and the average deviation of the exposure ratio between channels is reduced by 49.83% and 42.25% respectively. The code of the improved calibration method can be downloaded at https://github.com/GuanBanglei/CRF_Calibration.

Methods We improve the traditional CRF polynomial fitting calibration method to make the calibration results more accurate. Firstly, by analyzing the flow of the traditional calibration method, the reason for the dispersion of the calibration process and the inaccuracy of the results is the large number of invalid terms in the calibration data set. This results in

inconsistencies in the set employed to calculate the polynomial coefficients and exposure ratios. Secondly, we rewrite the global error function as a local error function and select the calibration data by dividing two images with adjacent exposure levels into a group to avoid invalid terms in the calibration set. In this case, the set of calculated polynomial coefficients is the same as that of data adopted to compute the exposure ratio. During the iterative computation, the equations for all multiple exposure combinations are united to ensure global optimization. Thirdly, the improved method is tested on the publicly available data set office and an industrial camera respectively. Compared with the traditional method, the improved method outputs more compact CRF curves for the three color channels with better consistency of exposure ratio data.

Results and Discussions Firstly, our method has better calculation accuracy. From the exposure ratio values among images of different exposure levels in Table 3, we find that the maximum exposure ratio difference between different color channels is 0.1506 and the average difference is 0.0603, while the corresponding values are 0.0664 and 0.0333 respectively in our method. The maximum difference and the average difference have a 59.96% reduction and a 49.83% reduction respectively. For the industrial camera (Table 4), the maximum deviation is reduced by 63.35% and the average deviation by 42.25%. Secondly, a reasonable explanation is given for the distribution of CRF curves for the three color channels. In Fig. 2, the B-channel curve is at the top, the G-channel curve is in the middle, and the R-channel curve is at the bottom. This is because the three color channels have different quantum absorption efficiencies for the spectrum. As shown in Fig. 5, in the absorption spectrum of silicon from 400 to 950 nm, the envelope of the B channel is the smallest, the R channel is the largest, and the G channel is the middle. For the uniform ambient spectrum, the B channel has the smallest pixel value, the R channel has the largest, and the G channel has the middle. It means that for the same pixel value, the B channel represents the largest irradiance, the G channel is the second largest, and the R channel is the smallest. As for the industrial camera, the G channel is slightly smaller than the R channel due to the working wavelength of the ordinary lens, with the working wavelength of ordinary lenses being about 360–780 nm. However, the B channel still indicates the highest radiation, demonstrating the distribution reasonableness of the calibration curves in Fig. 4. Thirdly, polynomials with an odd maximum order are more suitable for convergence during iterations. For the adopted data set, the iterative process is dispersed when the maximum order is 4 and 6, and overfitting occurs in the B and R channels when the maximum order is 5. The optimal result of the Office data set is obtained when the maximum order is 3.

Conclusions The proposed improved polynomial fitting CRF calibration method can address the inconsistency between the coefficients of the solved iterative polynomials and the set of exposure ratio data, which exists in the traditional calibration method, and enhance the accuracy of the CRF calibration and exposure ratio calculation of the images. The calibration results on the public data set and an industrial camera show that the maximum deviation of the exposure ratios between different color channels is reduced by 59.96% and 63.35% respectively, and the average deviation is reduced by 49.83% and 42.25% respectively. The distribution reasonableness of CRF curves is demonstrated by analyzing the spectral quantum absorption efficiency of the three channels of the color camera. Finally, the relationship between the highest order of the fitting polynomial and the convergence of the CRF calibration curves is discussed to provide guidance for the practical applications of the proposed method.

Key words imaging system; camera response function; multi-exposure images; fitting polynomial