



DOI: 10.12086/oe.2018.180083

高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法

陈晔曜¹, 蒋刚毅^{1,2}, 邵 华¹, 姜 浩¹, 郁 梅^{1,2*}¹ 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;² 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093

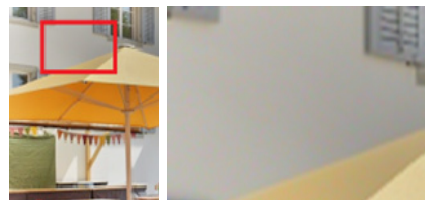
摘要: 高动态范围成像通常需要利用多个不同曝光时间的低动态范围图像来合成高动态范围图像。在合成后图像噪声会进一步放大, 可能导致最终的高动态范围图像视觉质量严重降低。针对合成图像需要保留低曝光图像中高亮区域的细节信息以及高曝光图像中低暗区域的细节信息, 且图像噪声与亮度有关这一问题, 本文提出一种基于亮度分区、噪声水平估计的高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法。首先, 根据图像的亮度信息, 确定低动态范围图像的不同亮度区域; 然后对图像不同亮度区域, 利用重叠块估计噪声水平, 根据得到的噪声水平, 指导图像的稀疏去噪; 最后, 对处理后的低动态范围图像, 采用融合方法合成高动态范围图像。实验结果表明, 所提出的算法能有效地抑制图像噪声, 合成的高动态范围图像具有更好的视觉质量。

关键词: 高动态范围图像; 多曝光图像; 亮度分区; 噪声水平; 稀疏去噪

中图分类号: O436.3; TP391.41

文献标志码: A

引用格式: 陈晔曜, 蒋刚毅, 邵华, 等. 高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 180083



Noise suppression algorithm in the process of high dynamic range image fusion

Chen Yeyao¹, Jiang Gangyi^{1,2}, Shao Hua¹, Jiang Hao¹, Yu Mei^{1,2*}¹ College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;² National Key Lab of Software New Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract: A high dynamic range image is generated by using multiple low dynamic range images with different exposure times. After the generation, the image noise will be further amplified, resulting in a severe degradation in the visual quality of the final high dynamic range image. In view of the problem that the generated image needs to retain the detail information of the high-lighted area in the low-exposure image and the detail information of the low-dark area in the high-exposure image and the image noise is related to the luminance, a noise suppression algorithm based on luminance partitioning and noise level estimation in the process of high dynamic range image fusion is proposed in this paper. Firstly, according to the luminance information of the image, different luminance regions of the low dynamic range image are determined. And then the overlapped blocks are used to estimate the noise level of the different luminance regions of the image, so as to guide the sparse denoising of the image. Finally, a high dynamic range image is generated by the processed low dynamic range images. The experimental results show that

收稿日期: 2018-02-14; 收到修改稿日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61671258); 浙江省自然科学基金项目(LY15F010005)

作者简介: 陈晔曜(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事多媒体信号处理的研究。E-mail: 648614106@qq.com

通信作者: 郁梅(1968-), 女, 博士, 教授, 主要从事多媒体信号处理与通信的研究。E-mail: yumei2@126.com

the proposed algorithm can effectively suppress noise, and the generated high dynamic range image has better visual quality.

Keywords: high dynamic range image; multiple exposure images; luminance partition; noise level; sparse denoising

Citation: Chen Y Y, Jiang G Y, Shao H, et al. Noise suppression algorithm in the process of high dynamic range image fusion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(7): 180083

1 引言

高动态范围(high dynamic range, HDR)图像能准确展现真实场景的动态范围,因此受到了人们的广泛关注。HDR 图像是通过合成多幅不同曝光的低动态范围(low dynamic range, LDR)图像得到,它克服了传统 LDR 图像动态范围小的限制。目前,获取 HDR 图像的方法主要有两类:第一类方法是通过估计相机响应曲线(camera response function, CRF)将 LDR 图像映射到辐照域^[1-4],并在辐照域中进行融合,从而得到一幅动态范围宽的图像。但该方法得到的 HDR 图像不能在常规图像设备上显示,还需要进行色调映射^[5-7]。第二类方法则是在图像域直接融合多幅不同曝光的 LDR 图像,从而产生一幅具有 HDR 效果的 LDR 图像。由于该方法无需进行 CRF 估计和色调映射,显得十分简单有效,因此受到了广泛关注。Ma 等人^[8]利用结构块分解来融合多曝光图像;Li 等人^[9]利用引导滤波,将图像分解为基本层和细节层,在不同层中分别融合图像;Liu 等人^[10]利用密集的尺度不变特征变换融合多曝光图像;Mertens 等人^[11]利用对比度、饱和度和良好曝光度三个参数构造权重值,融合多曝光图像。

但上述融合方法均没有考虑图像中的噪声。实际中,在低光环境下拍摄多曝光图像序列时,为防止图像模糊,相机会设置为高灵敏度,会产生噪声,且在图像融合后会进一步放大。目前已有的 HDR 图像噪声抑制方法是在图像融合前,对多曝光图像序列进行预处理。Akyuz 等人^[12]根据图像噪声水平与曝光时间成反比的关系,利用高曝光图像去抑制低曝光图像的噪声,但相应高曝光图像的噪声就无法被抑制;孙等人^[13]提出一种基于图像辐照值与曝光时间成线性关系的曲线拟合方法,可以抑制 HDR 图像中的高斯噪声,但噪声抑制效果受限于 CRF 的准确标定;Min 等人^[14]认为时域上的加权平均不足以降低传感器噪声,提出利用图像的空间相邻和时间相邻信息,对多曝光图像序列使用结构自适应时空平滑滤波器抑制噪声,取得了较好的效果。但他们的方法均需要将 LDR 图像映

射到辐照域进行处理,即需要已知图像序列的曝光信息。在实际中,多数图像的曝光信息很难获得,因此 Wei 等人^[15-16]利用强度映射函数(intensity mapping function)将 Akyuz 等人的方法扩展到图像域,其效果与 Akyuz 等人的方法类似。Lee 等人^[17]提出一种 HDR 图像融合中的噪声抑制方法,首先利用拉普拉斯金字塔分解多曝光图像序列,再利用高斯金字塔融合各分解的子带图像,对融合后的低频子带图像利用双边滤波去噪,对高频子带图像利用小波软阈值滤波去噪,去噪参数设置没有考虑子带图像不同区域的噪声水平,对图像整体设置为常数,进行一致性滤波,导致对噪声水平低的图像区域造成细节损失,对噪声水平高的图像区域去噪不完全。为了有效抑制图像噪声,且较好保留图像细节,Liu 等人^[18]提出一种噪声水平估计算法,与现有的噪声抑制算法^[19-21]结合,可以有效提高噪声抑制效果。Chen 等人^[22]提出利用神经网络对图像去噪,但特定的网络只针对特定水平的噪声,对于多曝光图像序列来说,噪声水平不一致,很难用单个网络来实现噪声抑制。Zhang 等人^[23]提出利用残差学习来克服传统神经网络只针对特定水平的噪声的缺点,但仍假设单幅图像所有区域的噪声水平相同。由于多曝光图像融合,需要保留低曝光图像中高亮区域的细节信息以及高曝光图像中低暗区域的细节信息,且图像噪声与亮度有关,因此直接对整幅图像估计噪声水平,得到的是噪声水平均值,以此指导图像滤波,无法保留多曝光图像序列不同亮度区域的细节信息,会导致融合图像的视觉质量降低。

针对上述分析,本文提出一种基于亮度分区、噪声水平估计的高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法,也适用于多曝光图像融合。新方法主要从两方面提高了噪声抑制算法的性能:一方面通过亮度分区,保留多曝光图像不同亮度区域的细节信息,避免对图像整体处理导致图像模糊;另一方面通过估计噪声水平,指导噪声抑制算法,相比于传统的盲去噪具有更好的去噪效果。

2 高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法

现有的 HDR 图像融合过程中的噪声抑制算法没有考虑图像在不同亮度区域的噪声水平, 容易出现细节损失、模糊等不好的视觉现象。因此, 本文提出了一种基于亮度分区、噪声水平估计的高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法, 可以在有效抑制图像低暗区域噪声的同时, 保留图像的细节信息。

首先对输入的 LDR 图像进行自适应亮度分区, 根据图像的亮度中值, 将原图像分解为三幅不同亮度范围的图像, 这可以有效保留所有曝光图像的中间亮度细节信息, 以及低曝光图像的高亮度区域细节信息和高曝光图像的低亮度区域细节信息, 再将三幅图像通过块滤波器分解为重叠图像块; 其次对每个重叠图像块利用结构张量提取弱纹理区域, 对该区域利用图像的协方差矩阵估计噪声水平, 以此准确指导图像去噪, 不会对图像造成过度平滑; 由于每个图像块估计的噪声水平可靠性不一致, 且噪声水平与亮度有关, 故对低亮度区域图像块采用“选择最大”策略, 对中间亮度和高亮度区域图像块采用“平均”策略, 得到最终的噪声水平; 然后根据得到的噪声水平, 指导图像的稀疏去噪; 对去噪后的三幅不同亮度图像进行重构; 最后将处理后的多幅 LDR 图像融合成 HDR 图像, 如图 1 所示。

2.1 图像亮度分区

HDR 图像具有比 LDR 图像更宽的亮度范围, 其特点是图像对比度大, 保留了多曝光图像序列的信息, 即低曝光图像的高亮区域信息, 高曝光图像的低暗区域信息以及所有曝光图像的中间亮度区域信息, 因此需要对多曝光图像序列进行亮度分区, 避免整体处理造成细节损失。将彩色图像转换颜色空间, 从 RGB 转

到 XYZ 空间, 其中 Y 是亮度分量, 计算亮度中值, 利用线性归一化函数, 将亮度中值归一化至 0~1 之间, 作为图像中间亮度值 T_h 。根据 T_h 值对图像进行亮度分区, 如下:

$$L_{\text{dark}} = L_{\text{max}} - (0.9 + 0.1 T_h) (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}), \quad (1)$$

$$L_{\text{bright}} = L_{\text{min}} + [0.6 + 0.4 (1 - T_h)] (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}), \quad (2)$$

其中: L_{dark} 为图像低亮度区域的阈值, 称为暗阈值; L_{bright} 为图像高亮度区域的阈值, 称为亮阈值; L_{max} 和 L_{min} 分别是图像灰度化并归一化到 0~1 之间的最大值和最小值。若图像亮度小于暗阈值, 则认为是低亮度区域; 若图像亮度大于亮阈值, 则认为是高亮度区域; 介于两者之间, 则认为是中间亮度区域。

作为一个实例, 图 2 给出了对多曝光图像序列进行亮度分区的结果, 图 2(a)是 7 个不同曝光得到的原始 LDR 图像, 图 2(b)是分割得到的对应的低亮度图像, 图 2(c)是对应的中间亮度图像, 图 2(d)是对应的高亮度图像; 图中, 白色表示属于该亮度区域, 黑色表示不属于该亮度区域。由实验结果分析, 可以发现一个现象: 亮度分区在图像局部存在相似性, 即对于单个亮度区间, 若某像素属于该区间, 则存在一定尺寸的邻域也属于该区间。利用该现象可以对图像不同亮度区域估计噪声水平。

2.2 对不同亮度区域估计噪声水平

噪声水平是指反映信号中噪声强度的参数, 它能够被应用于指导噪声抑制算法的设计, 准确估计的噪声水平可以有效提高噪声抑制算法的性能, 在抑制图像噪声的同时, 保留图像细节信息。

图像的噪声和纹理细节都属于图像的高频信息, 直接对原图像估计噪声水平会导致估计结果偏高, 从而使处理后的图像纹理信息丢失, 因此本文利用结构张量估计图像纹理强度, 提取图像的弱纹理区域估计噪声水平。假设噪声为加性高斯白噪声, 其噪声模型

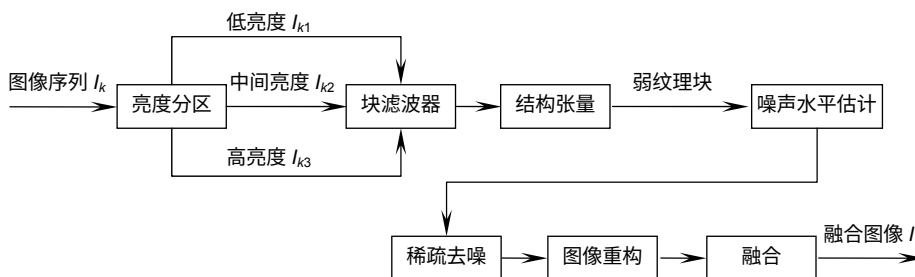


图 1 高动态范围图像融合过程中的噪声抑制算法框图

Fig. 1 Framework of noise suppression algorithm in the process of high dynamic range image



图 2 亮度分区图。(a) 不同曝光的 LDR 图像; (b) 低亮度图像; (c) 中间亮度图像; (d) 高亮度图像

Fig. 2 Images of luminance partition. (a) Different exposure LDR images; (b) Low luminance images; (c) Middle luminance images; (d) High luminance images

如下：

$$y_i = x_i + n, \quad (3)$$

其中： y_i 是图像局部区域的观测像素值， x_i 是图像局部区域的真实像素值， n 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的高斯噪声。将图像数据投影到最小方差方向上，由于噪声与信号无关，所以投影后噪声方差不变。最小方差方向根据 PCA 计算可得，由协方差矩阵的最小特征值所对应的特征向量确定，而方差等于最小特征值，即：

$$V = \lambda_{\min} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i y_i^T \right) = \lambda_{\min} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i x_i^T \right) + \sigma_n^2, \quad (4)$$

其中： M 是图像局部区域的总数。 $\lambda_{\min}$ 表示矩阵的最小特征值。由于高斯噪声在各个方向上具有相同的强度，即所有特征值都相同，所以估计的噪声水平为

$$\sigma_n^2 = \lambda_{\min} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i y_i^T \right) - \lambda_{\min} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i x_i^T \right), \quad (5)$$

结构张量定义为图像梯度的协方差矩阵，如下：

$$\begin{aligned} E &= [\partial_h \quad \partial_v]^T [\partial_h \quad \partial_v] \\ &= \begin{bmatrix} \partial_h^2 & \partial_h \partial_v \\ \partial_v \partial_h & \partial_v^2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中： ∂_h 和 ∂_v 分别表示图像的水平梯度和垂直梯度。该矩阵的迹可以衡量图像的纹理强度，迹越大，表示纹理越强，对应于图像局部区域 y_i 的纹理强度 H_i 为

$$H_i = \text{tr}(E), \quad (7)$$

其中： tr 表示矩阵的迹。定义阈值 τ ，用于提取图像的弱纹理区域：

$$p_i = \begin{cases} 0, & \text{if } H_i \leq \tau \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

当 $p_i = 0$ ，则表示该图像局部区域属于弱纹理区域， $p_i = 1$ 表示该图像局部区域属于强纹理区域。对于图像的弱纹理区域，由于纹理信息很少，其原始无噪图像的协方差矩阵的特征值可以假定为零，因此式 (5) 改为

$$\sigma_n^2 = \lambda_{\min} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i y_i^T \right), \quad (9)$$

其中： σ_n^2 是估计的噪声水平， N 是图像弱纹理区域的总数， $N \leq M$ 。由于不同图像纹理强度有差异，直接固定阈值 τ 会导致提取方法不能自适应图像内容，所以采用迭代方式。具体过程如下：初始阈值直接取原始图像的迹，即初始的弱纹理区域是原图，再进行噪声水平估计，用新得到的噪声水平修改阈值。在本文中，经过大量实验，迭代次数取 3，可以准确地估计出噪声水平。

由于需要分别对图像不同亮度区域估计噪声水平，根据 2.1 节中的观察：亮度分区在图像局部存在相似性，即对于单个亮度区间，若某像素属于该区间，则存在一定尺寸的邻域也属于该区间，如图 2 所示，因此只要将噪声图像分解为合适尺寸的重叠块，使该重叠块的区域均属于低亮度区域，则对该重叠块估计的噪声水平可作为低亮度区域的噪声水平。同理，中间亮度和高亮度区域的噪声水平可以同样测得。定义重叠块尺寸为 $w \times w$ ，非重叠区域尺寸为 d ，给定一幅图像，尺寸为 $m \times n$ ，则分解的重叠块数目为

$$N_{\text{over-b}} = \text{floor} \left(\frac{m-w}{d} + 1 \right) \times \text{floor} \left(\frac{n-w}{d} + 1 \right), \quad (10)$$

其中 $\text{floor}()$ 表示向下取整。由于要保证每个重叠块尽可能属于单个亮度区间, 所以非重叠区域不能过大, 但过小的非重叠区域会产生冗余的重叠块, 导致算法效率降低。根据大量的实验经验, 在这里, $w=100$, $d=20$ 可以准确地分解图像的重叠块。对分解的所有重叠块检测亮度区间并估计噪声水平。其中, 每个重叠块存在三个亮度区间, 计算三个亮度区间在重叠块中的比例:

$$R(k, i) = \frac{S_{k,i}}{S_{k,\text{sum}}} \quad (11)$$

其中: k 表示重叠块索引, 即第 k 个重叠块; $i=1, 2, 3$, 表示三个亮度区间, 定义 $i=1$ 表示低亮度区间; $i=2$ 表示中间亮度区间; $i=3$ 表示高亮度区间。 $S_{k,i}$ 表示第 k 个重叠块中属于 i 亮度区间的像素点个数, $S_{k,\text{sum}}$ 表示该重叠块的像素点总数。由于分解规则是针对图像空间的, 即每个重叠块均有可能包含多个亮度区间的像素, 但像素比例不同, 因此为区分重叠块属于某个亮度区间, 定义阈值 T_s , 当 $R(k, i) \geq T_s$ 时, 表示该重叠块中大部分像素都属于 i 亮度区间, 即认为该重叠块属于 i 亮度区间。为保证图像的每个亮度区间均有对应的多个重叠块, 阈值 T_s 不能取 1, 经过大量的实验, 在这里取值 0.9, 可以准确地区分重叠块。

由于噪声主要存在于图像的低亮度区域, 即低亮度区域的噪声水平高, 因此对该区域采用“选择最大”策略估计噪声水平。首先找出对应 $R(k, 1) \geq T_s$ 的所有重叠块; 然后根据噪声水平对选出的重叠块排序; 最后选出重叠块的噪声水平最大值作为最终估计的噪声水平。对图像中间亮度区域和高亮度区域采用“平均”策略, 可以解决由低亮度区域过多而造成的噪声水平估计过高的问题, 如下:

$$\begin{cases} \hat{\delta}_{n1} = \max(\delta_k), & \text{if } R(k, 1) \geq T_s \\ \hat{\delta}_{n2} = \frac{1}{P} \sum \delta_k, & \text{if } R(k, 2) \geq T_s \\ \hat{\delta}_{n3} = \frac{1}{Q} \sum \delta_k, & \text{if } R(k, 3) \geq T_s \end{cases} \quad (12)$$

其中: $k \in (1, N_{\text{over-b}})$; $R(k, 1) \geq T_s$ 为低亮度区域, $R(k, 2) \geq T_s$ 为中间亮度区域, $R(k, 3) \geq T_s$ 为高亮度区域; δ_k 是第 k 个重叠块的噪声水平, P 为中间亮度区域的重叠块数目, Q 为高亮度区域的重叠块数目。

2.3 基于稀疏表示的图像去噪

1) 稀疏表示: 观测图像建模为

$$y = Hx + v$$

其中: H 表示图像的退化矩阵, v 是图像噪声。稀疏表示的图像去噪方法是通过求解以下最小化问题, 从噪声图像 y 中恢复无噪图像 x :

$$\alpha_y = \arg \min \{ \|y - HD\alpha\|_2^2 + \lambda \|\alpha\|_1 \} \quad (13)$$

其中: D 是字典, λ 是正则化参数, α_y 是稀疏分解的系数。利用该式结合字典可以求得重建的图像 $\hat{x} = D\alpha_y$ 。但上式得到的稀疏系数不是真实无噪图像 x 的稀疏系数, 定义它与真实值的差值为稀疏噪声 $N_\alpha = \alpha_y - \alpha_x$ 。通过抑制 N_α 可以得到较好的去噪图像。由于无噪图像的稀疏系数 α_x 是未知的, 故 N_α 不能直接测量。但是由于自然图像的冗余特性, 根据非局部均值^[20]的思想, 稀疏系数 α_x 可计算为相似块稀疏系数的加权和, 用 β 表示, 那么 $\alpha_y - \beta$ 是对 N_α 的一个良好估计, 因此目标式改为

$$\alpha_y = \arg \min \{ \|y - HD\alpha\|_2^2 + \lambda \sum_i \|\alpha\|_1 + \gamma \sum_i \|\alpha_i - \beta_i\|_2 \} \quad (14)$$

其中: β_i 是对 α_i 的良好估计, λ , γ 是正则化参数。

2) 字典选择: 基于 K-means 和主成分分析 (principal components analysis, PCA) 的字典学习可以表征所有可能的自然图像的局部结构, 因此本文采用 PCA 子字典学习方法。首先从图像中提取图像块, 利用 K-means 算法将图像块分为 K 个聚类 $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$, 同时得到每个聚类 C_i 的质心 u_i 。然后对于每一个聚类 C_i , 利用 PCA 学习紧凑的字典, 最终产生 K 个 PCA 子字典 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_K\}$, 这 K 个子字典构建了一个大型的超完备字典。

对于每个要稀疏表示的图像块 x_j , 计算该图像块与各聚类 C_i 的距离, 选择具有最短距离的聚类所对应的 PCA 子字典进行稀疏表示, 这样可以保证该图像块的稀疏系数对应于其它子字典均为 0, 使给定图像块可以非常稀疏地表示, 因此可以去除式(14)中的局部稀疏正则项 $\|\alpha\|_1$, 化解为

$$\alpha_y = \arg \min \{ \|y - HD\alpha\|_2^2 + \lambda \sum_i \|\alpha_i - \beta_i\|_2 \} \quad (15)$$

在上述目标式中, 只有一个正则项 $\|\alpha_i - \beta_i\|_2$ 。该式可以迭代求解, 但式中的正则化参数 λ 需要设置, 对于不同的聚类, 若设置为常数, 则无法反映不同聚类的真实噪声水平。根据文献[19], 对迭代过程中不同聚类, 参数 λ 可由下式确定:

$$\lambda_{i,j} = \frac{2\sqrt{2}\sigma_n^2}{\sigma_{i,j} + \varepsilon} \quad (16)$$

其中: i 表示图像块类别, j 表示迭代次数, $\sigma_{i,j}$ 是由

第 j 次迭代, 第 i 个聚类里的相似图像块估计得到的标准差, σ_n 是原始图像的噪声标准差, 可以通过 2.2 节中的方法求得, ε 是一个很小的常数, 防止 $\lambda_{i,j}$ 过大, 根据大量的实验经验, 在这里取值 1×10^{-8} 。迭代结束, 得到最终的稀疏系数 α_y , 重建图像。对去噪后的多曝光图像序列利用现有的 HDR 融合方法进行融合。

3 实验结果与分析

为评估所提出算法的性能, 将现有的融合方法与本文算法结合, 基于 MATLAB 2016a 平台的开发环境, 对不同曝光图像序列进行实验分析, 实验采用的 6 种融合算法均来自作者网站上提供的程序代码, 测试动态图像序列来自文献[8]。

3.1 噪声水平估计结果评估

三幅不同曝光图像如图 3 所示, 噪声水平估计结果如表 1 所示。表 1 中, 噪声水平 0.00 表示图像不存在属于该亮度区间的像素点。通过比较可以看到, 重叠块分解针对像素点进行, 估计的噪声水平与真实值接近, 可以准确有效地指导图像去噪。

3.2 噪声水平指导去噪结果评估

图 4 给出了噪声水平估计对去噪结果影响的比较, 采用多曝光图像序列 lamp 进行实验分析。图 4(a)是多曝光图像序列, 图 4(b)是估计噪声水平得到的结果, 图 4(c)是无噪声水平估计得到的结果, 其中左图是融合结果, 红色框内区域局部放大见融合图像右侧。对图像不同亮度区域估计噪声水平, 以此指导图像稀疏去噪, 会在有效抑制图像低亮度区域噪声的同时, 较好保留图像高亮度区域的细节信息; 无噪声水平估计, 则对图像所有区域以相同强度去噪, 会模糊图像高亮度区域的细节, 造成图像视觉质量降低。

3.3 HDR 图像噪声抑制结果评估

图 5、图 6 给出了本文算法对静态图像噪声抑制结果的比较, 采用多曝光图像序列 cafe、window 进行实验, 融合的 HDR 图像采用基于 Reinhard 模型的色调映射算法进行显示。图 5(a)、图 6(a)是多曝光图像序列, 图 5(b)、图 6(b)是 Debevec 等^[4]的算法, 由于融合算法中没有考虑图像噪声, 导致最终融合图像噪声可见; 图 5(c)、图 6(c)是本文算法与融合算法结合得

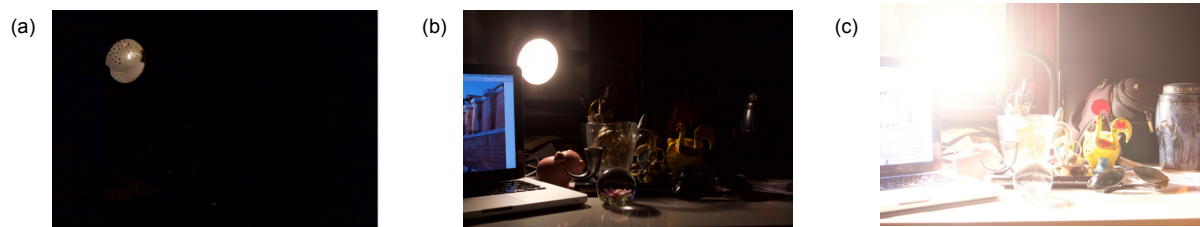


图 3 不同曝光图像。(a) 低曝光图像; (b) 中间曝光图像; (c) 高曝光图像

Fig. 3 Different exposure images. (a) Low exposure image; (b) Middle exposure image; (c) High exposure image

表 1 噪声水平估计

Table 1 Results of noise level estimation

图像	区间	真实噪声水平	估计噪声水平
低曝光图像	低亮度区间	7.65	7.25
	中间亮度区间	5.1	4.73
	高亮度区间	0.00	0.00
中间曝光图像	低亮度区间	7.65	7.26
	中间亮度区间	5.1	5.19
	高亮度区间	2.25	2.31
高曝光图像	低亮度区间	0.00	0.00
	中间亮度区间	5.1	4.87
	高亮度区间	2.25	2.48

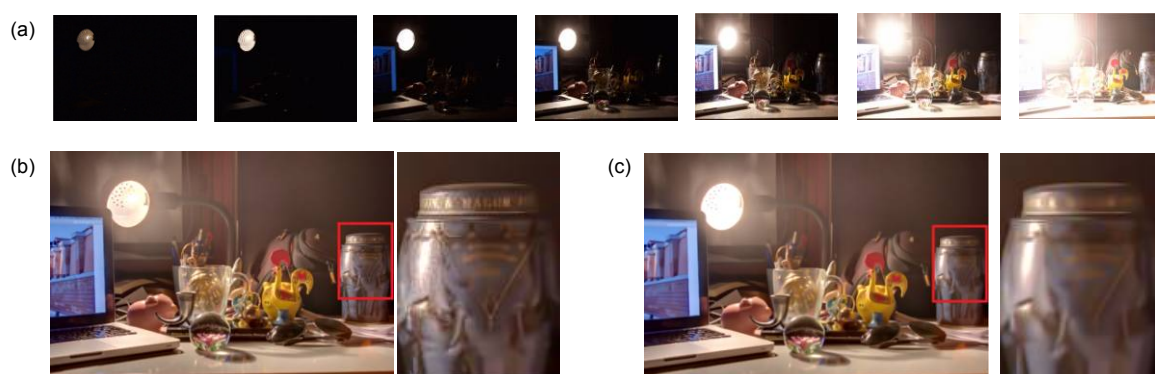


图4 噪声水平指导去噪对比实验。(a) 多曝光图像序列；(b) 噪声水平估计；(c) 无噪声水平估计
Fig. 4 Comparison experiment of noise level guide denoising. (a) Multi-exposure image sequence; (b) Noise level estimation; (c) No noise level estimation

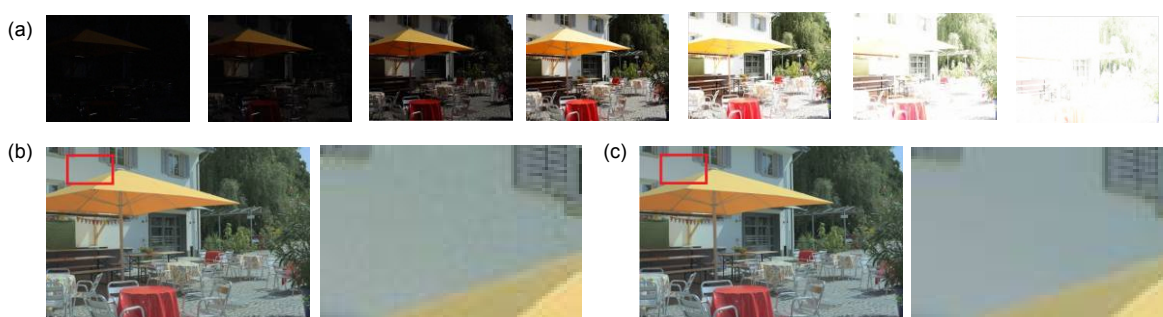


图5 Cafe序列的对比实验。(a) 多曝光图像序列；(b) Debevec 等^[4]；(c) 本文算法
Fig. 5 Comparison experiment of cafe sequence. (a) Multi-exposure image sequence; (b) Debevec et al^[4]; (c) The proposed algorithm

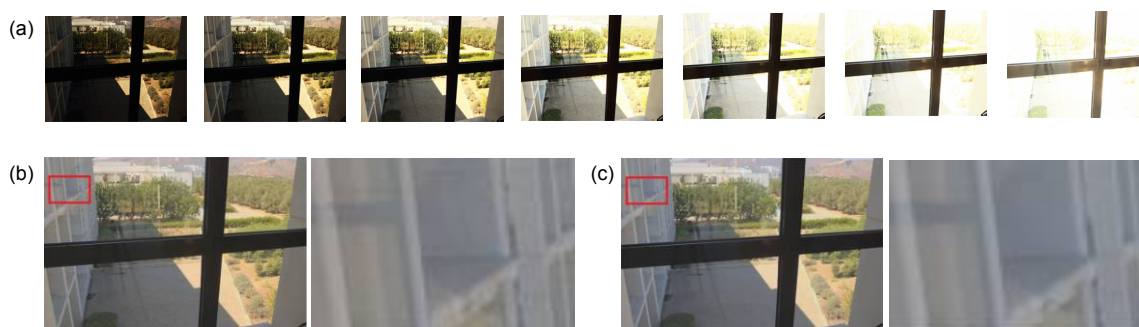


图6 Window序列的对比实验。(a) 多曝光图像序列；(b) Debevec 等^[4]；(c) 本文算法
Fig. 6 Comparison experiment of window sequence. (a) Multi-exposure image sequence; (b) Debevec et al^[4]; (c) The proposed algorithm

到的结果，图像噪声基本不可见，且图像纹理保留较好，没有出现过度平滑现象。

图7给出了本文算法对动态图像噪声抑制结果的比较，采用多曝光图像序列 Arch 进行实验，融合的HDR图像采用基于 Reinhard 模型的色调映射算法进行显示。图7(a)是多曝光图像序列；图7(b)是Oh等^[2]的算法，得到的图像偏红，存在颜色失真；图7(d)是

Sen等^[3]的算法，融合的图片仍含有噪声；图7(c)、图7(e)是本文算法与融合算法结合得到的结果，图像噪声基本不可见，且不存在颜色失真。

3.4 多曝光融合图像噪声抑制结果评估

将本文算法应用于多曝光图像融合中，采用多曝光图像序列 cafe、window 进行实验，图8(a)、图9(a)

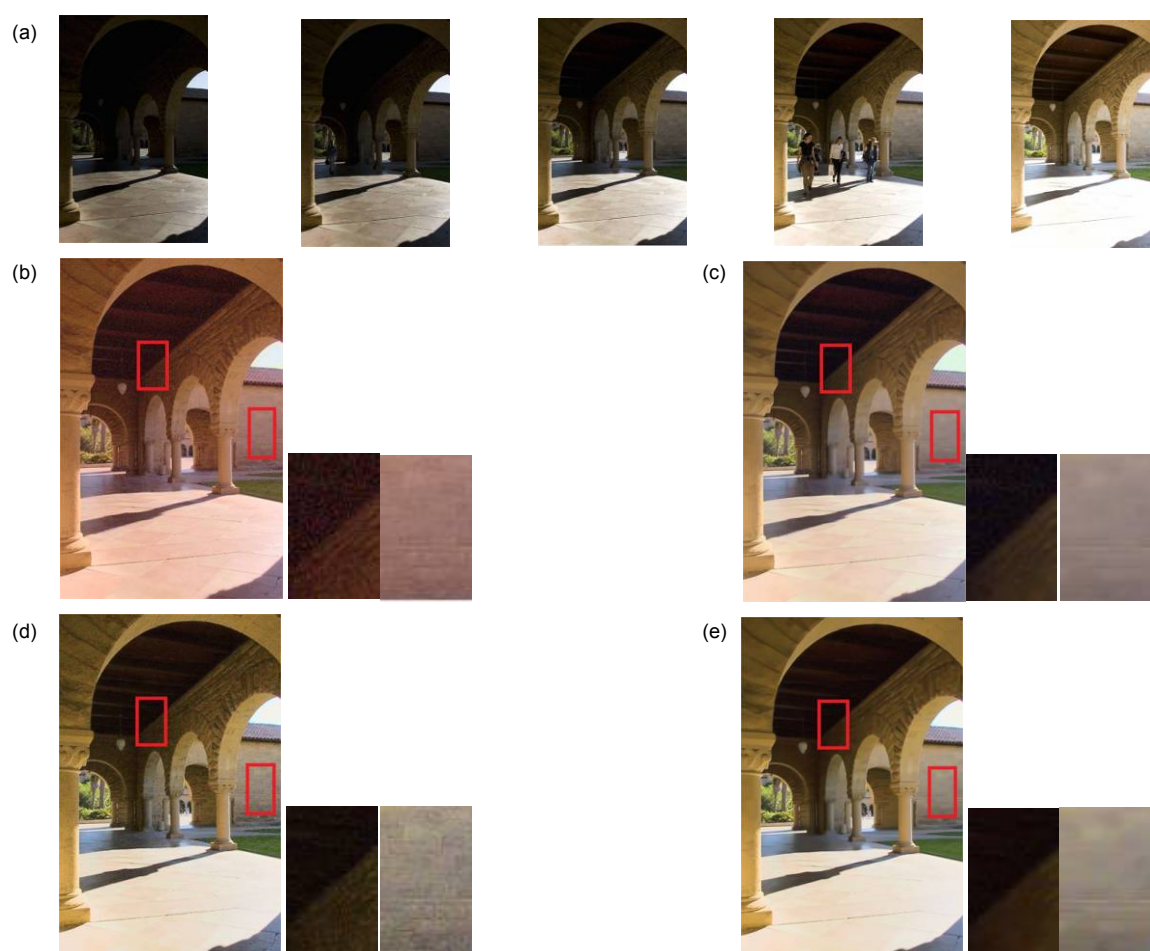


图7 Arch序列的对比实验。(a) 多曝光图像序列; (b) Oh等^[2]; (c) 本文算法; (d) Sen等^[3]; (e) 本文算法
Fig. 7 Comparison experiment of Arch sequence. (a) Multi-exposure image sequence; (b) Oh et al^[2]; (d) Sen et al^[3]; (c), (e) The proposed algorithm

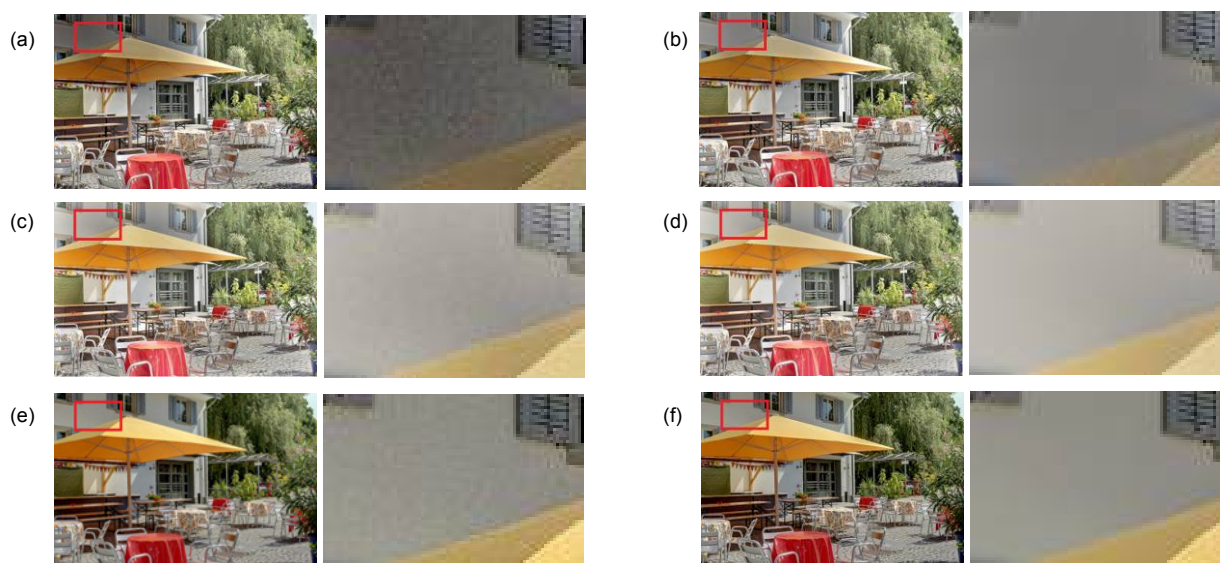


图8 Cafe序列的对比实验。(a) Li等^[9]; (b) 本文算法; (c) Liu等^[10]; (d) 本文算法; (e) Mertens等^[11]; (f) 本文算法

Fig. 8 Comparison experiment of cafe sequence. (a) Li et al^[9]; (c) Liu et al^[10]; (e) Mertens et al^[11]; (b), (d), (f) The proposed algorithm

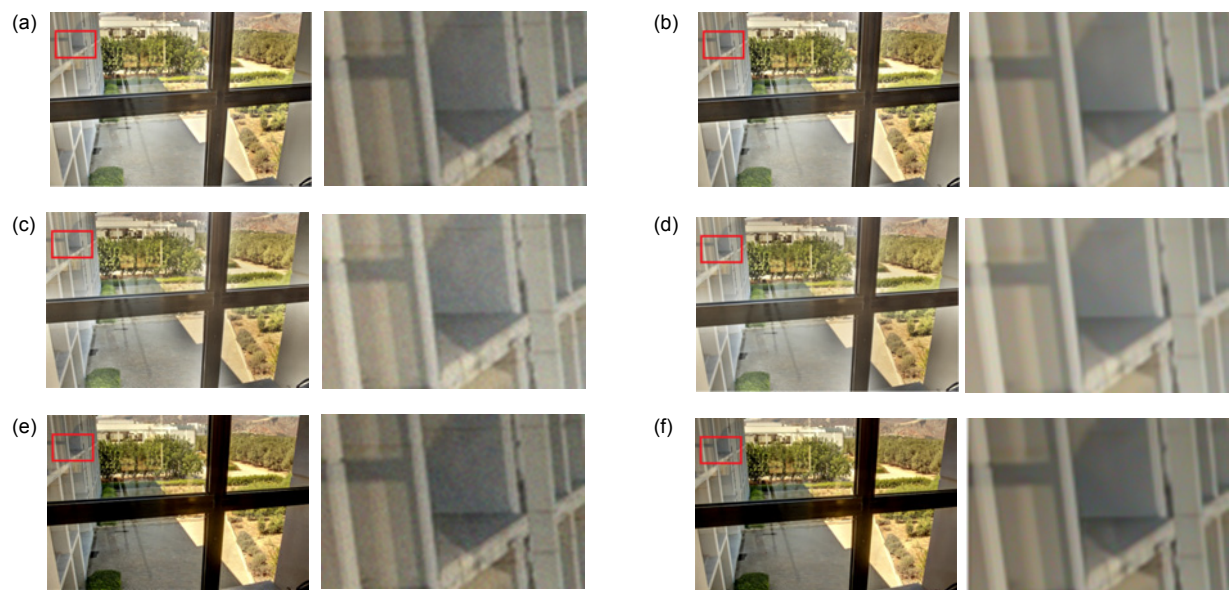


图 9 Window 序列的对比实验。(a) Li 等^[9]; (b) 本文算法; (c) Liu 等^[10]; (d) 本文算法; (e) Mertens 等^[11]; (f) 本文算法
Fig. 9 Comparison experiment of window sequence. (a) Li et al^[9]; (c) Liu et al^[10]; (e) Mertens et al^[11]; (b), (d), (f) The proposed algorithm

是 Li^[9]等的算法, 图 8(c)、图 9(c)是 Liu 等^[10]的算法, 图 8(e)、图 9(e)是 Mertens 等^[11]的算法, 图 8(b)、图 9(b), 图 8(d)、图 9(d), 图 8(f)、图 9(f)是本文算法, 通过比较可以看到, 本文算法对于图像噪声抑制效果明显, 且图像纹理清晰, 没有出现细节丢失现象。

3.5 融合图像客观指标评估

从客观角度, 采用融合图像质量评价指标 Q_{abf} 对

本文算法处理的结果进行评价, 实验序列为 lamp、cafe、window、Arch 图像序列, 评价结果如表 2 所示。 Q_{abf} 反映融合图像的质量, 值越大, 表明融合图像的质量越高。其中, Debevec 等^[4]、Li 等^[9]、Liu 等^[10]和 Mertens 等^[11]算法处理静态图像, 因此未测 Arch 序列的 Q_{abf} 值; Oh 等^[2]和 Sen 等^[3]算法处理动态图像, 因此未测 lamp、cafe、window 序列的 Q_{abf} 值。由表 2 可知, 利用本文算法处理后的融合图像结果更为理想。

表 2 融合图像 Q_{abf} 值对比
Table 2 Q_{abf} value comparison of fusion images

融合方法	噪声抑制	Lamp	Cafe	Window	Arch
Debevec ^[4]	本文算法	0.4646	0.5158	0.4136	/
	不处理	0.3657	0.4957	0.3826	/
Li ^[9]	本文算法	0.5580	0.6868	0.6646	/
	不处理	0.4601	0.6294	0.5993	/
Liu ^[10]	本文算法	0.5821	0.6868	0.6545	/
	不处理	0.4845	0.6357	0.6008	/
Mertens ^[11]	本文算法	0.5803	0.6587	0.6514	/
	不处理	0.4842	0.6123	0.5914	/
Oh ^[2]	本文算法	/	/	/	0.4835
	不处理	/	/	/	0.4244
Sen ^[3]	本文算法	/	/	/	0.5031
	不处理	/	/	/	0.4524

4 结 论

噪声是影响图像视觉质量的重要因素, 本文提出了一种高动态范围成像过程中的噪声抑制算法。根据多曝光图像序列需要保留的细节信息以及噪声与亮度的关系, 首先对多曝光图像序列进行自适应亮度分区; 然后利用重叠块估计图像不同亮度区域的噪声水平, 以此指导图像的稀疏分解去噪; 最后将处理后的多曝光图像序列融合成单幅高动态范围图像。实验结果表明本文算法获得的 HDR 图像具有更好的视觉质量, 在有效抑制图像噪声的同时, 保留图像细节信息。另外, 将本文算法应用于多曝光图像融合中, 也取得了较好的效果。后续研究将进一步考虑利用亮度信息自适应估计噪声水平, 提高噪声抑制效果。

参考文献

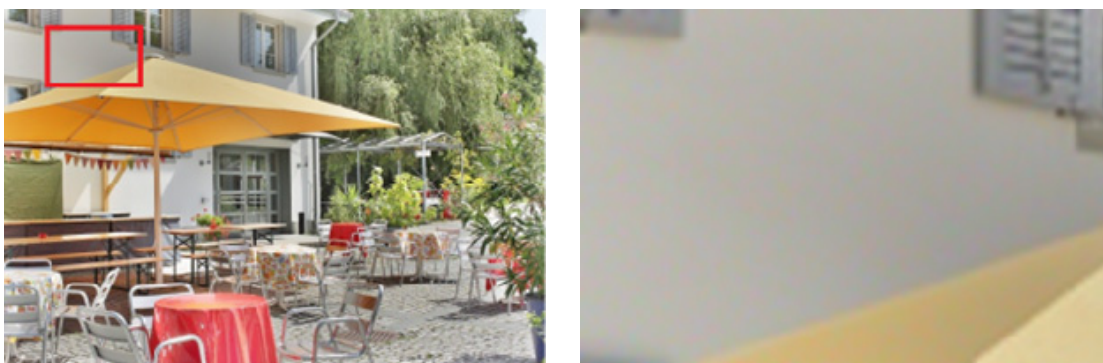
- [1] Chiang J C, Kao P H, Chen Y S, et al. High-dynamic-range image generation and coding for multi-exposure multi-view images[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2017, **36**(7): 2786–2814.
- [2] Oh T H, Lee J Y, Tai Y W, et al. Robust high dynamic range imaging by rank minimization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, **37**(6): 1219–1232.
- [3] Sen P, Kalantari N K, Yaesoubi M, et al. Robust patch-based hdr reconstruction of dynamic scenes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, **31**(6): 1–11. doi: 10.1145/2366145.2366222.
- [4] 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*, New York: ACM/Press, 1997: 369–378.
- [5] Ma K, Yeganeh H, Zeng K, et al. High dynamic range image compression by optimizing tone mapped image quality index[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, **24**(10): 3086–3097.
- [6] Li Y Z, Sharan L, Adelson E H. Compressing and companding high dynamic range images with subband architectures[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 836–844.
- [7] Lu B B, Li Y J, Wang Y K, et al. Adaptive logarithmic tone mapping arithmetic with luminance regionalization[J]. *Application Research of Computers*, 2018, **35**(9). <http://www.arocmag.com/article/02-2018-09-046.html>.
芦碧波, 李玉静, 王玉琨, 等. 亮度分区自适应对数色调映射算法[J]. *计算机应用研究*, 2018, **35**(9). <http://www.arocmag.com/article/02-2018-09-046.html>.
- [8] Ma K, Li H, Yong H W, et al. Robust multi-exposure image fusion: a structural patch decomposition approach[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **26**(5): 2519–2532.
- [9] Li S T, Kang X D, Hu J W. Image fusion with guided filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(7): 2864–2875.
- [10] Liu Y, Wang Z F. Dense SIFT for ghost-free multi-exposure fusion[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, **31**: 208–224.
- [11] Mertens T, Kautz J, Van Reeth F. Exposure fusion: a simple and practical alternative to high dynamic range photography[J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, **28**(1): 161–171.
- [12] OğuzAkyüz A, Reinhard E. Noise reduction in high dynamic range imaging[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, **18**(5): 366–376.
- [13] Sun Q D, Zhang J, Li X F. A novel noise removal algorithm for HDR image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, **15**(2): 229–235.
孙德全, 张军, 李晓峰. 一种去除 HDR 图像噪声的新方法[J]. *中国图象图形学报*, 2010, **15**(2): 229–235.
- [14] Min T H, Park R H, Chang S. Noise reduction in high dynamic range images[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2011, **5**(3): 315–328.
- [15] Yao W, Li Z G, Rahardja S. Intensity mapping function based weighted frame averaging for high dynamic range imaging[C]//*Proceedings of 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Beijing, China: IEEE, 2011: 1574–1577.
- [16] Yao W, Li Z G, Rahardja S. Noise reduction for differently exposed images[C]//*Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Kyoto, Japan: IEEE, 2012: 917–920.
- [17] Lee D K, Park R H, Chang S. Ghost and noise removal in exposure fusion for high dynamic range imaging[J]. *International Journal of Computer Graphics & Animation*, 2014, **4**(4): 1–18.
- [18] Liu X H, Tanaka M, Okutomi M. Single-image noise level estimation for blind denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(12): 5226–5237.
- [19] Dong W S, Zhang L, Shi G M, et al. Nonlocally centralized sparse representation for image restoration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(4): 1620–1630.
- [20] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2010, **4**(2): 490–530.
- [21] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(8): 2080–2095.
- [22] Chen Y J, Pock T. Trainable nonlinear reaction diffusion: a flexible framework for fast and effective image restoration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, **39**(6): 1256–1272.
- [23] Zhang K, Zuo W M, Chen Y J, et al. Beyond a gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **26**(7): 3142–3155.

Noise suppression algorithm in the process of high dynamic range image fusion

Chen Yeyao¹, Jiang Gangyi^{1,2}, Shao Hua¹, Jiang Hao¹, Yu Mei^{1,2*}

¹College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²National Key Lab of Software New Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China



The experiment results of cafe sequence

Overview: High dynamic range (HDR) images can accurately represent the dynamic range of real scenes and are therefore receiving widespread attention. At present, the methods for obtaining HDR images are mainly divided into two categories. The first type is to map the original low dynamic range (LDR) images to the irradiation field by estimating the camera response function, and perform fusion in the irradiation field to obtain a wide dynamic range image. The second is to fuse a multiple exposure image sequence directly in the pixel domain to produce an LDR image with HDR effect. However, these fusion methods do not consider the effect of noise in the images. When shooting a multi-exposure image sequence in an actual low light environment, the camera sets high sensitivity to prevent images blurring, which generates noise. After the fusion, the image noise will be further amplified, resulting in a severe degradation in the visual quality of the final HDR image. To solve this problem, according to the noise characteristics of multi-exposure images, this paper proposes a noise suppression algorithm in the high dynamic range image fusion process based on luminance partition and noise level estimation. Firstly, according to the luminance information of the images, each LDR image is decomposed into three areas of low-luminance, middle-luminance, and high-luminance. Noise levels are estimated by using overlapping blocks in three luminance areas. Since the noise mainly exists in the dark areas of the image, therefore, for the low-luminance area, "winner-take-all" strategy is used to process the overlapping blocks to obtain the noise level. For the middle-luminance and high-luminance areas, an average strategy is used to obtain the noise level. Then the noise level is used to guide the sparse denoising of the image. The denoised images of the three different luminance regions are combined into a single complete LDR image. Finally, the processed multiple exposure LDR images are fused into a single high-quality HDR image. Experimental results show that the proposed algorithm not only can effectively suppress the noise of the image, but also processes the image according to the noise level without blurring the details of the image and preserves the texture information of the original image well. In addition, using the existing objective metrics to evaluate the fusion images, the results show that the image quality obtained by this method is higher, and image detail information is retained while suppressing image noise.

Citation: Chen Y Y, Jiang G Y, Shao H, *et al.* Noise suppression algorithm in the process of high dynamic range image fusion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(7): 180083

Supported by National Natural Science Foundation of China (61671258) and Zhejiang Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY15F010005)

* E-mail: yumei2@126.com