

一种去除 HDR 图像噪声的新方法

孙德全 张 军 李晓峰

(四川大学计算机学院图形图像研究所, 成都 610064)

摘 要 为了提高 HDR (high dynamic range) 图像的质量, 提出一种针对 HDR 图像滤噪的新方法。首先取得图像组中相同空间位置的点构成像素组; 然后利用相机的 IFF (intensity transfer function) 还原成亮度值; 接着通过求解最小二乘问题拟合 $L-t$ (luminance-exposure time) 直线, 并用该直线修正各点亮度值; 最后再通过 IFF 转换成像素值。图像组经滤噪之后, 再用于合成 HDR 图像。实验结果表明, 该算法运算量小, 能有效去除椒盐型噪声, 对高斯型噪声抑制效果明显, 优于 A. & E. (Ahmet & Erit) 算法, 这也是该算法的主要特色。

关键字 高动态范围 去除噪声 最小二乘 亮度响应曲线

中图法分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)02-0229-07

A Novel Noise Removal Algorithm for HDR Image

SUN De-quan, ZHANG Jun, LIXiao-feng

(Graphics and Image Institute of Computer Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract In order to improve the quality of HDR (high dynamic range) image, a novel noise removal algorithm is proposed. Firstly, pixel value sequences are obtained from the same spatial position in different frames. Secondly, pixel values are transferred to luminance by camera's IFF (intensity transfer function). Thirdly, the regression beeline $L-t$ (luminance-exposure time) is acquired by solving a least-squared error problem, and then it was used to revise the luminance values of the sequence. Finally, the revised luminance values are anti-transferred to pixel values. Synthesis operation is performed after noise removal. Experiment demonstrates that our algorithm is fast. It can eliminate salt & pepper noise clearly, and can reduce Gaussian noise effectively. It is better than A. & E.'s (Ahmet & Erit). These are the prevailing features of our algorithm.

Keywords high dynamic range (HDR), noise removal, least-square error, intensity transfer function (IFF)

0 引 言

数码相机在拍摄用于合成 HDR (high dynamic range) 图像的图像序列 (简称: 图像组) 时, 不可避免地引入了噪声, 并且在 HDR 合成中被进一步放大, 导致最终的 HDR 图像质量大幅度下降。因此, 对 HDR 图像滤噪是十分必要的 (如图 1 所示)。关于 HDR 图像显示, 主要有 TRO (tone reproduction operator), TRC (tone reproduction curve) 两类方法^[1-9], 本

文采用文献 [2] 方法。

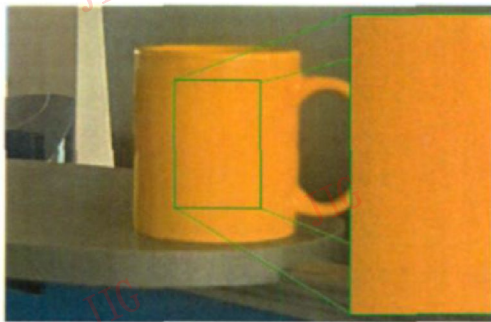
近年来, 针对 HDR 图像滤噪主要有两类方法: 第 1 类方法是在 HDR 图像合成之后, 把 HDR 图像当作普通图像, 采用传统图像滤噪算法, 如均值滤波^[10], 中值滤波^[11], 基于小波技术滤波^[12-13]等。这类方法通常以牺牲图像细节, 使图像变得模糊为代价, 也不能“干净”地滤除噪声。并且, 滤噪操作发生在 HDR 合成之后, 图像信息已大量丢失的情况下, 滤噪不仅不能还原图像真实信息, 相反还会进一步丢失图像信息。第 2 类方法则在 HDR 合成前, 先

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA01Z328)

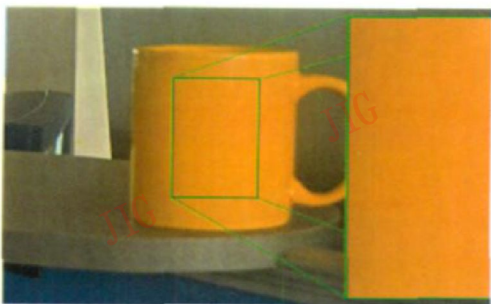
收稿日期: 2008-07-21; 改回日期: 2008-10-23

第一作者简介: 孙德全 (1983—), 男, 四川大学计算机学院图形图像研究所硕士研究生。主要研究方向为 HDR 图像合成、滤噪、显示、编码; HDR 视频实时显示。E-mail: dequan_sun@163.com

对图像组进行滤噪,然后再合成 HDR 图像。属于这一类的方法并不多见,具有代表性的有: Ahmet 等人提出的加权滤噪算法^[14]。该方法采用图像组相邻几帧的亮度加权来修正亮度值,并基于了在高曝光时间下噪声小的假设,不能滤除椒盐噪声,而且对每个像素点三通道都进行反复的加权计算,计算量大。



(a) 未经去噪处理



(b) 经过去噪处理

图 1 HDR 合成图(右下角为选区放大结果)

Fig. 1 HDR image(amplified on the right corner)

本文方法属第 2 类方法,建立在 Paul 的数码相机成像理论之上^[15]。首先利用 ITF(intensity transfer function)把图像组中相同空间位置的像素点构成的序列(简称:像素组)还原成亮度值;然后分析二阶差分趋近于零的点并作为拟合点,利用最小二乘法拟合出该组的 L-t(luminance-exposure time)直线;再利用该直线修正各点的亮度值;最后利用 ITF 把亮度值转换成像素值,从而达到滤噪目的。该方法能够有效去除椒盐噪声;并且对高斯噪声抑制效果显著;同时对每一位置的像素组,每个通道只需一

次回归计算,算法速度快。在此基础上提出的加速拟合算法,避免了大量二阶差分计算,不仅保证了滤噪性能,而且时间复杂度明显优于 A. & E 算法。算法流程如图 2 所示。

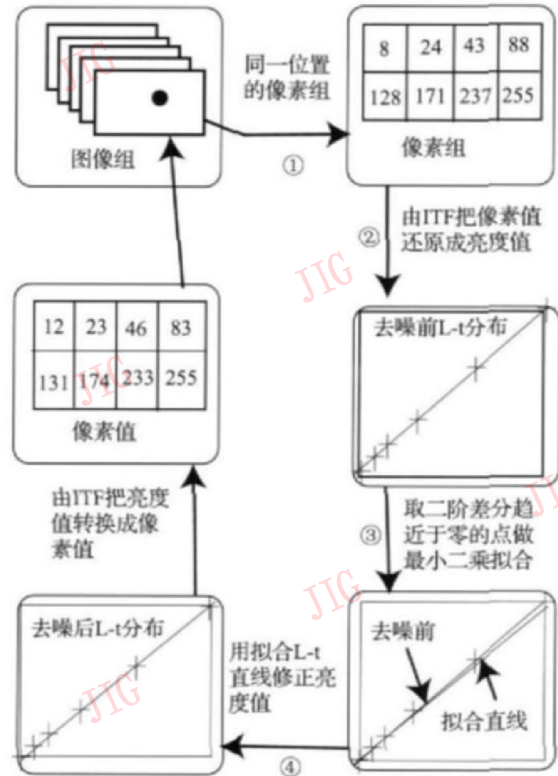


图 2 算法流程

Fig 2 Flow chart of the algorithm

1 成像原理及 ITF 标定

数码相机拍摄图片的过程如图 3 所示,感光元件(通常为 CCD, CMOS)在接收到亮度(曝光量)后,将光信号转换为正比于亮度的模拟电信号,再通过 A/D(模/数)转换成离散信号,最后经过后续的非线性运算得到数码照片^[15-16]。由于成像过程存在多次非线性变换,无法知道每个映射函数,但是整个过程是把亮度 L 映射成像素值 P。故只需要测定 256 对 (L, P) 映射即可,并且同一相机的 ITF 只需要标定一次,就可以处理该相机拍摄的所有图片。



图 3 数码相机成像过程

Fig 3 Photography process of digital camera

把场景辐照度 E 看作光能量密度, 则亮度便是在曝光时间 Δt 内的能量积累, 即有 $L = \int_0^{\Delta t} E dt$ 。由于拍摄时间和间隔时间都很短, 故可认为场景中对对应点的辐照度前后没有发生变化, 故有:

$$L = E \cdot t \quad (1)$$

式中, E 为辐射度, t 为曝光时间。由此可知, 场景中同一空间位置点在不同曝光时间下所得 $L-t$ 分布是过原点的直线。这正是本文算法的理论基础。

相机 ITF 的标定^[15 17-18], 本文采用两步完成:

- (1) 采用文献 [15] 方法初步标定;
- (2) 利用一组具有不同曝光时间的图像修正 ITF;

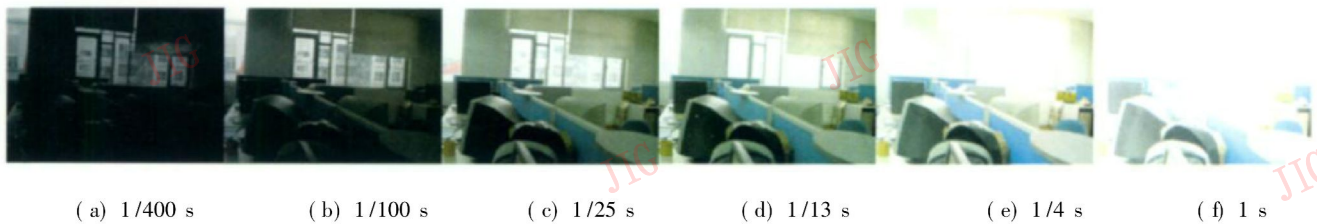


图 4 修正 ITF 的图像组 (固定光圈和焦距)

Fig 4 Frames used to revise camera's ITF

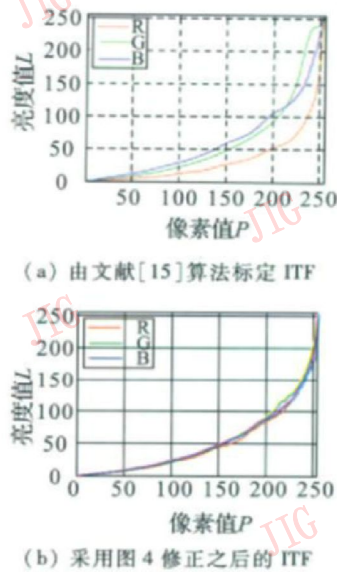


图 5 相机 ITF 曲线, 亮度值 L 已经规格化到 0 ~ 255

Fig. 5 ITF of the camera Luminance is normalized to 0 ~ 255

2 HDR 噪声滤除原理

2.1 HDR 图像噪声

HDR 图像噪声因图像组携带噪声所致。由于数码相机固有的缺陷, 在曝光, 非线性变换和后期处理过程中都可能引入噪声。根据产生噪声的机理,

由于文献 [15] 在标定相机 ITF 时, 在 $N_{15+}(0)$, $N_{15-}(255)$ ($N_{\rho}(x_0)$ 表示 x_0 的 ρ 邻域) 范围内采集的数据不够准确, 使得标定的 ITF 在“两端”不准确。为了提高 ITF 精度, 使用一组图像 (如图 4 所示各子图下数字表示曝光时间 (固定光圈和焦距, 单位: 秒)) 各子图下数字表示曝光时间, 运用下文第 2 节算法计算每个像素值 P 对应的拟合亮度 L 的算术平均值, 并作为该像素点对应的亮度 (如图 5 所示)。

经过修正之后的 ITF, 三通道基本相同, 这不仅和相机的一般特性相符, 也与文献 [17] 采用多项式拟合标定法结果相似。

可以将噪声主要分为 3 类: 静电噪声、光子噪声和读出噪声^[14 19]。数码相机感光元件及其集成电路中, 由于电子的热运动产生电流从而形成静电噪声, 静电噪声随着感光元件温度升高而加剧, 服从泊松分布或正态分布模型。由于光子从各个方向随机时间进入感光元件, 形成光子噪声, 在高曝光下主要以光子噪声为主, 服从泊松分布模型。除此之外, 在信号放大, 采样等过程中出现信号跃变, 截断等引入的噪声称为读出噪声。读出噪声成因较多, 本文实验部分采用高斯噪声模拟因跃变, 截断等产生的读出噪声。

2.2 提取“曝光适度”点

由于场景中同一点在不同曝光时间下受到的噪声干扰的类型和程度不同, 因此, 并不能把所有点用于拟合 $L-t$ 直线, 而只能提取受干扰相对较小的“曝光适度”点参与拟合。然而“曝光适度”不仅与曝光时间 t 有关, 还与该点的场景辐照度 E 有关。根据式 (1), “曝光适度”点的 $L-t$ 分布近似呈直线分布。故可采用二阶差分趋近于零的原则来提取“曝光适度”点 (如图 6 所示)。

考察 T 是否为“曝光适度”点, 则计算其一阶前向差分 d 和一阶后向差分 d_b , 并由 d , d_b 计算判断标准 λ 具体如下:

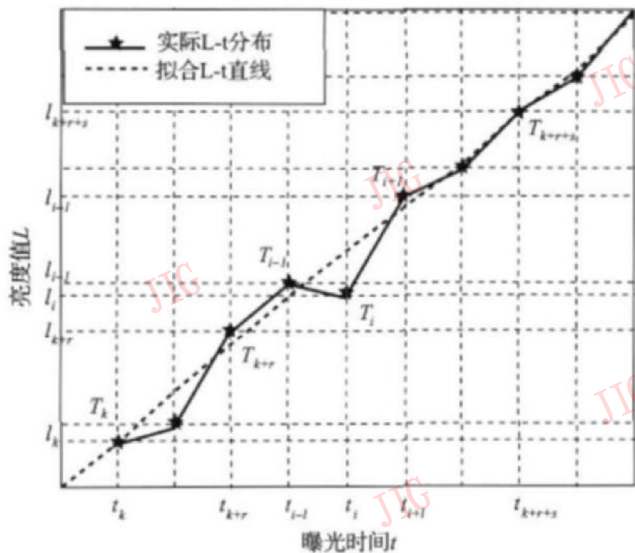


图 6 二阶差分提取“曝光适度”点

Fig 6 Extract proper exposure points by second difference

$$d_f = \frac{l_i - l_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

$$d_b = \frac{l_{i+1} - l_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Th \leq \lambda = \text{abs}(d_f/d_b) \leq 2 - Th \\ d_f \geq 0, d_b \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, Th 为经验阈值 $[0.8 \ 1]$, abs 为求绝对值运算。

下面是提取“曝光适度”点的详细算法描述:

1) 首先排除噪声点(噪声点判定算法在下文讨论)和像素值 $P = 255$ 的点, 转步骤 2)。

2) 如果 $P < 255$ 的点总数小于 3 则认为该组像素点信息不足, 无法处理, 算法结束, 否则依次判断各点是否满足步骤 4), 转步骤 3)。

3) 如果有满足步骤 4) 的点, 则转步骤 4), 否则步骤 9)。

4) 如果只有一个点满足步骤 4), 则用该点及其两端相邻点作为拟合点集, 算法结束。否则转步骤 5)。

5) 如果满足步骤 4) 的点都不相邻, 则转步骤 8)。否则把满足步骤 4) 的相邻点归并成组后, 如果只有一个组, 则用该组作为拟合点集, 算法结束, 否则转步骤 6)。

6) 寻找最大组(包含元素最多)作为拟合点集, 算法结束。如果存在多个最大组, 则转步骤 7)。

7) 选取平均亮度值最大的组作为拟合点集, 算法结束。

8) 对于每个满足步骤 4) 式的点, 依次考察排

在其前, 以及其后的点, 并用步骤 2)、步骤 3)、步骤 4) 判断, 如果步骤 4) 成立, 则将该点归并到该组, 转步骤 6)。

9) 寻找满足步骤 2)、步骤 3)、步骤 4) 的点 T_k, T_{k+r}, T_{k+r+s} (其中: $k = 1, 2, \dots, N-2; r = 1, 2, \dots, N-k-1; s = 1, 2, \dots, N-k-r$) 作为拟合点, 算法结束, 如图 6 所示, 如果仍没有满足步骤 4) 的点, 算法结束。其中 $N = \text{size}(P < 255)$, T_k 表示第 k 个点, size 为返回满足条件的点数。

该算法在绝大多数情况下, 都会在步骤 4)、步骤 5) 结束, 其时间复杂度为 $O(N)$ 。经过提取出“曝光适度”点后, 使用这些点作为拟合点, 进行 L-t 直线拟合。

2.3 L-t 直线拟合

先做如下符号设定:

$Q = \{(l_i, t_i) \mid t_i < t_{i+1}, 1 \leq i \leq N\}$: 用于拟合的“曝光适度”点集, l_i 为第 i 点亮度值, t_i 为第 i 点曝光时间, 该集合由第 3.2 节算法得到。 N 为用于拟合的点集合大小, 即 $N = \text{size of set}(Q)$ 。函数 size of set 为返回集合中元素的个数。 M 为图像组大小。 $\tau(i)$ 为第 i 点的拟合权系数。 $f(t)$ 为目标拟合直线。则由最小二乘原理得:

$$f(t_i) = K t_i \quad (5)$$

式中, K 为拟合直线斜率, 其物理意义是拟合辐照度。

$$M \text{ in}_{\text{err}} = \sum_{i=1}^N \tau(i) [(f(t_i) - l_i)]^2 \quad (6)$$

式中, $M \text{ in}_{\text{err}}$ 表示取最小二乘误差。算法中, 认为每一个“曝光适度”点具有同等重要的地位, 即 $\tau(i) = 1$ 。用多项式函数类 $Q = \{1, x^1, x^2, \dots, x^n\}$ 作为拟合函数类, 则有:

$$K \sum_{i=1}^N t_i^2 = \sum_{i=1}^N t_i l_i \quad (7)$$

由式 (5) ~ (7) 有:

$$f(t_i) = \frac{\sum_{i=1}^N t_i l_i}{\sum_{i=1}^N t_i^2} \cdot t_i \quad 1 \leq i \leq M \quad (8)$$

2.4 去除噪声

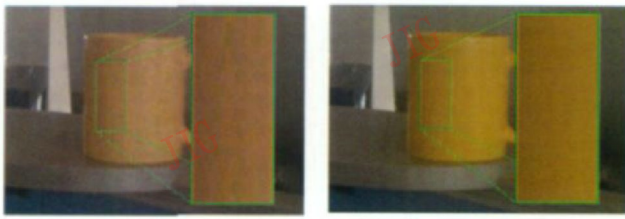
根据噪声点的不同类型采用不同的去噪或降噪方式。把像素组中的点分为两类: 噪声点和带噪点。

对于噪声点, 利用式 (8) 直接去除噪声。噪声点的判断准则:

$$\left\{ \begin{array}{l} (l_i > l_{i-1} \&\& l_i < l_{i+1}) \text{ or } (l_i < l_{i-1} \&\& l_i < l_{i+1}) \quad 1 \leq i \leq M \\ l_0 = l_2 \\ l_{M+1} = l_M \end{array} \right. \quad (9)$$

考虑到 ITF 标定中不可避免的误差, 为了保持图像灰度平滑过渡, 对“带噪点”则采用如下方式处理 (如图 7 所示, 可放大观察)。

$$l_i = \frac{l_i + f(t_i)}{2} \quad (10)$$



(a) 式 (8) 效果 (b) 式 (8) 处理噪声点, 式 (10) 处理带噪点

图 7 去除噪声点 (选自图像组中第 4 帧)

Fig 7 Remove noise (select the fourth frame)

3 快速加权拟合去噪算法

上文算法把“曝光适度”点集作为一个确定集, 并采用二阶差分判断各点是否是该确定集的元素, 这是算法耗时的关键。下面提出一种加速拟合算法则避开此过程, 把“曝光适度”点集作为一个模糊集, 给每个像素值 $P < 255$ 的点赋予一个隶属度, 并以此隶属度作为式 (6) 中的权系数 $\tau(i)$ 。实验结果表明, 该算法去噪性良好, 时间复杂度低。先做如下符号假设:

$$S = \{ (p_i, t_i) \mid p_i < 255 \wedge t_i < t_{i+1}, 1 \leq i \leq H \}$$

式中, P_i 为第 i 点像素值, t_i 为第 i 点曝光时间。 H 为集合 S 的大小, 即 $H = \text{size of set}(S)$ 。 M 为图像组大小。 $\tau(i)$ 为第 i 点的拟合权系数。

该算法基于下面 3 条假设:

- 1) S 中, 分布在越中间部分的点其隶属于“曝光适度”点集的隶属度越大。
- 2) 如果 H 越小, 则 P_i 越大。
- 3) P_i 大体上均匀分布在 $0 \sim 255$ 之间。

在 S 中, P_i, t_i 从小到大排列, 故处于中间部分的点, 曝光时间适中, 其像素值 P 也相应分布在 $0 \sim 255$ 中间部分, 由文献 [15] 标定 ITF 法知, 越靠近中间部分, ITF 越准确, 故把中间部分点近似为“曝光

适度”点是合理的。同样, S 中所有的 P_i 由小到大排列, 如果 H 越小, 则说明所有的 P_i 均比较大, 则 P_1 也大。也就是说: 随着 H 减小, 平均像素值 P' 发生“右”移。对于第 (3) 点假设, 则可以通过控制相机快门时间来实现。

分析知, S 中处于中间部分的“曝光适度”点能较好地反应 $L-t$ 的线性关系。可先后采用帽子函数, 宽帽子函数和高斯函数, 以高斯函数效果最好, 基于这样的事实, 设计权函数 $\tau(i)$ 如下:

$$\tau(i) = \exp \left\{ - \frac{(i-u)^2}{\phi \sigma^2} \right\} \quad (11)$$

$$u = \alpha + (1-\alpha) \cdot \frac{H+1}{2} \quad \alpha \in [0, 1] \quad (12)$$

$$\frac{\alpha-1}{-1} = \frac{H-2}{M-2} \quad (13)$$

式中, ϕ 为可调系数, 用于控制 $\tau(i)$ 变化速率。 σ 为标准差, μ 为数学期望, α 为张力系数。

由式 (12), 式 (13):

$$u = \frac{H^2 - 3H + 2M - 2}{2(M-2)} \quad (14)$$

由式 (11), 式 (14):

$$\tau(i) = \exp \left\{ - \frac{2(M-2)i - H^2 + 3H - 2M + 2}{2\phi \sigma^2 (M-2)} \right\} \quad (15)$$

式 (11) 的高斯权值保证了在低曝光和过曝光情况下的点权值较低 (称其为次要点), 在拟合中起次要作用, 而处于中间部分的点权值大 (称其为主要点), 在拟合中起主要作用。 ϕ 控制权值的下降速度, 当从主要点变为次要点时, 权值迅速下降, 当从次要点变为主要点时, 权值迅速上升, 以保证拟合直线的准确。

当 H 较小时, 则说明该点对应的场景辐照度 E 较大, 即使曝光时间 Δt 较短, 也能积累较多的光子能量, 受到噪声干扰就不明显, 它们虽然属于低曝光点, 但也应提升权值, 即使 μ “左”移。故 μ 设计为 $u_2 = 1, u_M = \frac{M+1}{2}$ 的线性组合 (式 (12)), 如图 8 所示。在拟合 $L-t$ 直线之前, 还需要利用式 (9) 寻找噪声点并修正噪声点权值为零。

改进之后的算法, 避免了寻找“曝光适度”点的烦琐过程, 也没有 A. & E. 算法中繁杂的加权操作, 这使得该算法计算量小, 也保持了良好的去噪性能。

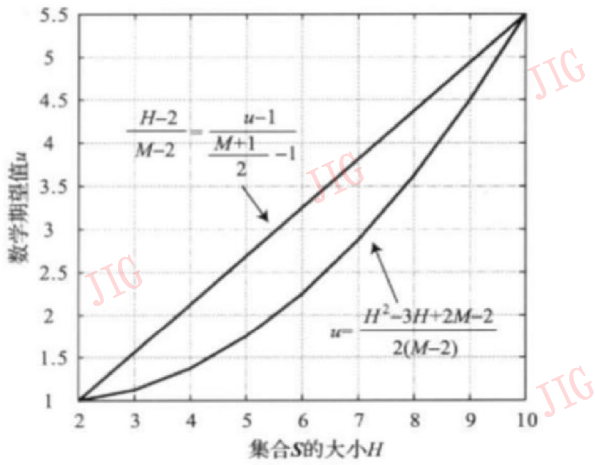


图 8 μ 值“左”移分布, $M = 10$
 Fig 8 μ moves left $M = 10$

4 实验及对比

本文算法与 A. &E 算法同属第 2 类方法, 保持 HDR 合成算法的输入接口不变。A. &E 算法采用相邻若干张图 (用 Cluster 定义) 的加权和来修正亮度值, 该算法能够有效降低图像噪声, 但不能彻底去除噪声, 尤其对椒盐噪声响应极差。本文算法则通过提取“曝光适度”点, 拟合 L-t 直线, 并用该直线来修正亮度值, 从而达到去噪目的, 该算法能有效去除椒盐噪声, 对高斯噪声有明显抑制作用 (如图 9-10 所示)。图 9 选自图像组第 5 帧, 图 9(a) 带有 5% 的椒盐噪声原始图像, 图 9(b) 采用 A. &E 算法去噪

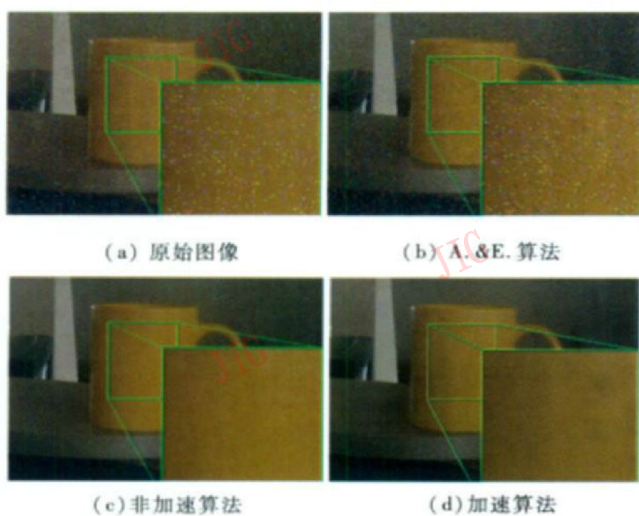


图 9 椒盐噪声响应对比 (左下角为选区色调均
 化结果, 右下角为选区放大结果)
 Fig. 9 Contrast to salt and pepper noise response (down-left
 is the hue equalization of selected region, down-right is
 amplified of selected region)

结果 ($Cluster = 4$), 该算法对椒盐噪声响应很差, 图 9(c) 采用本文非加速算法去噪结果, 图 9(d) 采用本文加速算法去噪结果, 其中 $\phi = 4$ $\sigma = 0.5$ 。图 10 选自图像组第 5 帧, 图 10(a) 带有均值为 0 方差为 0.005 的高斯噪声原始图像, 图 10(b) 采用 A. &E 算法去噪结果 ($Cluster = 4$), 图 10(c) 采用本文非加速算法去噪结果, 图 10(d) 采用本文加速算法去噪结果, 其中 $\phi = 4$ $\sigma = 0.5$ 。

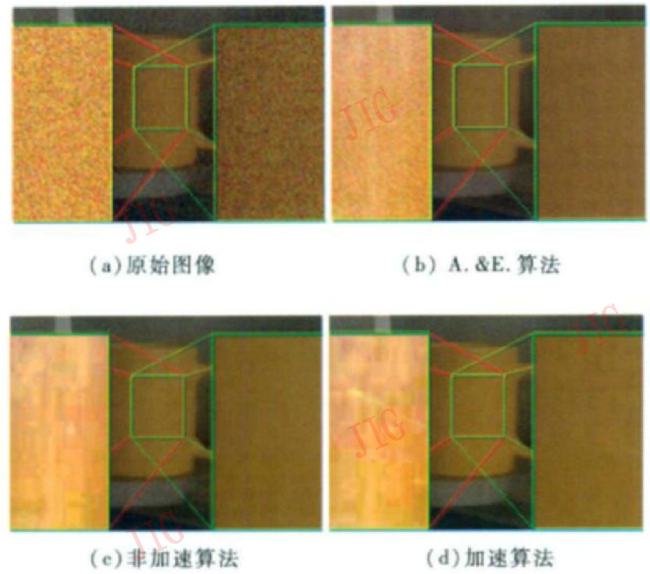


图 10 高斯噪声响应对比 (左下角为选区色调均
 化结果, 右下角为选区放大结果)
 Fig. 10 Contrast to Gaussian noise response (down-left is
 the hue equalization of selected region, down-right is
 amplified of selected region)

加速拟合算法保持了良好去噪性能的同时, 时间复杂度明显优于 A. &E 算法 (如图 11 所示)。

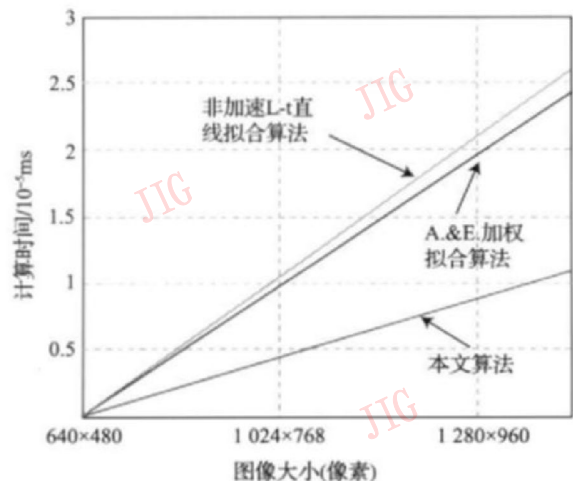


图 11 算法时间复杂度对比
 Fig 11 Contrast of time complexity

5 结 论

本文研究了针对 HDR 图像滤噪的方法。该方法保证了 HDR 合成算法的输入接口不变; 能够有效滤除椒盐噪声; 对高斯噪声抑制效果明显; 对每一像素组只需要回归计算一次, 计算量小, 这些是优于 A. & E. 方法之处。但是本算法依赖于相机 ITF 的准确标定, 这是本算法的不足之处, 也是后续工作的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] Qiu Guo-ping, Duan Jiang, Finlayson G D. Learning to display high dynamic range images [J]. ACM Transactions on Pattern Recognition, 2007, 40(10): 2641-2655
- [2] Erik R, Michael S, Peter S, et al. Photographic tone reproduction for digital images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 267-276
- [3] Ward G, Rushmeier H, Piatko C. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3(4): 291-306
- [4] Tumblin J, Rushmeier H E. Tone reproduction for realistic images [J]. ACM Transactions on Computer Graphics and Applications, 1993, 13(6): 42-48
- [5] Tumblin J, Hodgins JK, Guenter B K. Two methods for display of high contrast images [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1999, 19(1): 56-94
- [6] Ashikhmin M. A tone mapping algorithm for high contrast images [C] // Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, Switzerland Eurographics Association Aire-la-ville, 2002: 145-156
- [7] DeCarlo J, Wandell B. Rendering high dynamic range images [C] // Proceedings of SPIE Electronic Imaging Conference, [s. n.], 2001: 392-401
- [8] Kang S B, Uyttendale M, Winder S, et al. High dynamic range video [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2003, 22(3): 319-325
- [9] Wang Jia-liang, Gu Yao-lin. Method for displaying high dynamic range image based on local adaptive [J]. Computer Application, 2007, 27(4): 989-990 [王家亮, 顾耀林. 基于局部适应性的高动态范围图像显示技术 [J]. 计算机应用, 2007, 27(4): 989-990]
- [10] Pan Jian-jia, Tang Yuan-yan, Pan Bao-chang. The algorithm of fast mean filtering [C] // Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing [s. n.], 2007: 244-248
- [11] Gallagher N C, Wise G L. A theoretical analysis of the properties of median filters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1981, 29(6): 1136-1141
- [12] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81: 425-455
- [13] Tian Pei, Li Qing-zhou, Ma Ping, et al. A new method based on wavelet transform for image denoising [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3): 394-399 [田沛, 李庆周, 马平等. 一种基于小波变换的图像去噪新方法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3): 394-399]
- [14] Ahmet O, guz Akyüz, Erik Reinhard. Noise reduction in high dynamic range imaging [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(5): 366-376
- [15] Debevec Paul E, Malik Jitendra. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C] // Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM Transaction, Los Angeles, CA, USA, ACM Press Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 369-378
- [16] Hua Shun-gang, Wang Li-dan, Ou Zong-ying. Constructing high dynamic range image based on photographs with different amounts of exposure [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(5): 678-682 [华顺刚, 王丽丹, 欧宗瑛. 基于多幅不同曝光量照片的场景高动态范围图像合成 [J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(5): 678-682]
- [17] Mitsunaga Tomoo, Nayar Shree K. Radiometric self calibration [C] // Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins CO, USA, Springer, 1999: 381-388
- [18] Zhou Jian-kang, Shen Weimin, Tang Min-xue. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(10): 96-100 [周建康, 沈为民, 唐敏学. CCD 测量动态范围的扩展技术 [J]. 光电工程, 2006, 33(10): 96-100]
- [19] Healey G E, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(3): 267-276