

改进拉普拉斯金字塔模型的高动态图像色调映射方法

梁 云, 莫俊彬

(华南农业大学信息学院计算机科学与技术系 广州 501642)
(sдлиangyun@163.com)

摘 要: 高动态图像的色调映射是图像处理的研究热点, 用于解决常规色调范围显示设备无法有效显示高动态图像的问题. 针对当前色调映射不能精准地显示出图像内容(如丢失细节、模糊弱边缘)的问题, 提出一种改进拉普拉斯金字塔模型的高动态图像色调映射方法. 首先基于滤波和下采样处理计算出对输入图像进行了简单去噪的高斯金字塔; 然后通过约束强边缘数量分离出高斯金字塔中每层图像的强/弱边缘和细节; 再针对每层图像构造其分层映射函数, 通过增强细节、弱边缘的对比度以及保持强边缘对每层图像进行逐点映射, 并据此计算描述每层对比度变化的拉普拉斯金字塔; 最后根据拉普拉斯金字塔自底向上重构出目标图像. 与已有的多种色调映射方法相比, 根据客观评价和主观评价的结果表明, 文中方法能增强细节和弱边缘、避免强边缘处梯度反转, 更清晰、准确地显示出高动态图像内容.

关键词: 拉普拉斯金字塔; 高动态图像; 细节增强; 色调压缩
中图法分类号: TP391

Improved Laplacian Model for Tone Mapping of HDR Image

Liang Yun and Mo Junbin

(Department of Computer Science & Technology, School of Information, South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract: The tone mapping of HDR (high dynamic range) images is one of the hot topics in image processing, which is used to handle the problem that regular equipments cannot efficiently display HDR images. However, current tone mapping methods cannot accurately display image content such as losing details and blurring weak edges. This paper proposes a new tone mapping method by improving the Laplacian pyramid model. Firstly, the Gaussian pyramid of the input image is computed by using down-sample and filter to reduce noise. Then, the strong edges, weak edges, and details of each Gaussian pyramid layer are separated via restricting the pixel numbers of strong edges. Then different mapping function is defined for each Gaussian pyramid layer, and is used to implement pixel-wise mapping on each layer to enhance the comparison of details and weak edges and preserving strong edges. Based on the mapped Gaussian pyramid, the corresponding Laplacian pyramid is computed to record the comparison changes of each layer. Finally, the result image is constructed from bottom to top based on Laplacian pyramid. Compared with existing tone mapping methods, based on the subjective and objective assessments, our method can display HDR images more clearly and accurately by enhancing details, weak edges and avoiding gradient reverse.

Key words: Laplacian pyramid; high dynamic range image; enhance details; compress tone scope

收稿日期: 2014-09-08; 修回日期: 2014-10-10. 基金项目: 国家自然科学基金(61202293). 梁 云(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 广东省高等学校“千百十人才培养工程”校级培养对象, CCF YOCSEF 委员, 主要研究方向为图形图像处理、模式识别等; 莫俊彬(1993—), 男, 在校学生.

1 相关工作

在日光、灯光和反射光等强光源的影响下,人们常需要用高动态图像摄取设备拍摄照片才能表现出自然场景的内容.高动态图像是指图像亮度数量级一般在 2^{16} 甚至更多的图像,它们的色调范围超出一

般显示设备的动态表示范围,因此,只能表示 256 级亮度的显示器、相机(含多种通道情况)不能正常显示该类图像,只能显示出小范围变化的图像区域,而曝光过度或曝光不足部分因不在亮度显示范围内所以无法显示,常被丢失或模糊(如图 1 a 的天空区域).近年来,人们通过色调映射将高动态图像的色调转换为普通设备的支持范围,以解决其显示问题.



图 1 高动态图像的显示

由于高动态图像比传统的 24 位彩色图像记录了更宽的色彩范围,因此高动态图像色调映射的目的是:如何用 256 级亮度的显示器将高动态图像正常显示出来.当前常见方法主要采用色调映射技术来模拟和近似表示高动态图像 2^{16} 数量级的信息,如图 1 b, 1 c 所示,但这些方法常丢失细节(如图 1 b 天空的云朵变化)、模糊弱边缘(如图 1 b 雕塑牛身体的纹理变化),不能有效地表示高动态图像的内容.本文通过改进拉普拉斯金字塔模型,建立分别编辑强/弱边缘和细节的机制,构造分层映射模型,实现了能够增强细节和弱边缘、保持图像主要内容的色调映射方法.通过大量实验验证,并基于客观评价和主观评价结果表明,本文方法能够更准确、有效地表示高动态图像的内容.

当前,色调映射方法通过图像分层实现,根据图像分层依据的不同,色调映射方法大致分为两大类:基于滤波的分层方法^[1-6]和基于图像内容的分层方法^[7-15].基于滤波的方法根据逐步迭代滤波的平滑结果分解图像,将相邻 2 次平滑处理的差异视为细节,将最底层的平滑结果视为基本层;再通过增强或保持细节层、压制基本层和锐化边缘实现细节保持的色调映射.例如, Durand 等^[1]根据双边滤波结果分解图像实现细节层的提升和基本层的压缩; Farbman 等^[2]基于加权最小二乘滤波方法实现色调映射; Li 等^[5]通过构造对称的分析-合成滤波机制实现分层; Fattal^[4]则根据二代小波分解编辑图像不同层次的色调和细节.此外, Su 等^[6]在联合滤波框架下分别根据迭代非对称采样机制和局部线性退化模

型设计退化图像,并在伪彩色处理模式下进行细节增强和色调映射,能够有效地平滑噪声.随着新边缘感知滤波方法的提出,越来越多的滤波方法用于色调映射,如基于二代小波的 Edge-avoid 方法^[4]、 L_0 梯度最小化方法^[3]、基于三次滤波的方法^[16]等.基于滤波的图像分层方法可渐进地控制图像平滑和边缘锐化,能够有效地抑制噪声,是当前图像分层编辑的研究热点.但滤波会增强显著边缘、弱化细小边缘、引起边缘失真,在分层编辑实现色调映射中容易引起梯度反转或丢失细节.

基于图像内容的分层方法通过分析图像的结构信息和局部细节分解图像,进而在保持图像基本内容和边缘的基础上压缩图像亮度范围以实现色调映射.如 Tumblin 等^[10]根据各向异性方法引入 LCIS (low curvature image simplifiers)以分解图像; Subr 等^[7]和朱薇等^[11]通过分析图像局部极值间的振荡来分解图像. Fattal 等^[13]将多光照下的数据作为输入构建类高斯金字塔的结构,运用多尺度的双边分解策略实现图像分层编辑和细节提升. Bhat 等^[8]通过保持边缘处梯度并压缩边缘外梯度实现色调映射. Hadwiger 等^[9]提出了基于连续概率密度稀疏编码的多分辨率图像金字塔,打破了传统的空间尺度上的分解模式,而稀疏概率密度映射的方式使得该方法可以处理超大尺度的图像数据. Fattal 等^[14]通过控制梯度域的变化实现了色调映射. Reinhard 等^[15]则根据成像规律实现了高动态图像的显示处理.基于图像内容分层的高动态图像映射方法直观形象、简单易行,越来越受到人们的重视.近年来,拉普拉斯金字塔模型因其优良特性和分层表示特征,

越来越多地被用于图像显示处理. 如 Shen 等^[17]以多种曝光图像作为输入, 利用拉普拉斯金字塔提高图像显示质量; Paris 等^[12]通过分析像素点亮度的变化, 利用拉普拉斯金字塔将图像分层, 进而实现色调映射. 本文方法将继承拉普拉斯金字塔在处理多曝光图像上的优势, 通过改进 Paris 等^[12]提出的拉普拉斯金字塔, 提出了一种新的高动态图像色调映

射方法. 该方法能够在变换图像色调到正常范围的同时增强图像细节, 保持图像边缘, 消除噪声影响.

2 本文方法

本文方法通过改进拉普拉斯金字塔算子实现, 主要流程如图 2 所示.



图 2 本文方法的主要流程

各步骤具体实现如下:

1) 对输入的高动态图像进行类型转换, 转化为灰度图, 并计算出其彩色空间的颜色比例信息. 记录颜色比例信息, 在完成色调变换后再引入颜色信息, 得到映射后的彩色图像.

2) 对灰度图构造高斯金字塔, 将灰度图的宽度和高度每次下取样为原来的 $1/2$, 并对下取样结果进行高斯滤波以消除噪声影响, 最后将处理结果保存为高斯金字塔对应层的图像.

3) 对每一层的高斯图像进行重映射处理. 重映射是本文方法的主要创新, 与 Paris 等^[12]方法仅将图像分为细节和边缘不同, 本文方法通过分离和分别控制图像的细节、强边缘和弱边缘实现重映射. 首先对输入图像进行分解, 通过设定相邻像素点对比度的取值范围, 把细节、强边缘和弱边缘从图像中分离出来, 设定对比度 $> \tau_{\text{edge}}$ 的为强边缘, 对比度 $< \tau_{\text{detail}}$ 的为细节, 而对比度介于两者之间的为弱边缘. 本文通过限定各类边缘的数量来实现对 τ_{edge} 和 τ_{detail} 的求解, 具体通过限定强边缘像素点的个数 $\leq n_{\text{edge}}$ 计算出当前层中 τ_{edge} 的取值. 最后, 根据分离出的强边缘、弱边缘和细节, 对它们分别进行弱化、小幅度增强和大幅度增强处理, 通过 r_{detail} 函数调整像素点周围振幅以增强细节,

$$r_{\text{detail}}(i) = g_0 + f_{\text{detail}}(|i - g_0|/\sigma) \quad (1)$$

其中, $f_{\text{detail}}(x) = e^x$ 是映射函数, 主要用来增强图像的细节部分; g_0 表示当前要处理的像素点, $|i - g_0|$ 则为像素点 i 与图像周围像素点的差异. $|i - g_0|$ 较大时 ($> \tau_{\text{edge}}$) 描述的是图像的强边缘, 稍微小些时 ($< \tau_{\text{edge}}$ 且 $> \tau_{\text{detail}}$) 描述图像的弱边缘, 更小时 ($< \tau_{\text{detail}}$) 则描述图像细节, 其中 $\text{sign}(i - g_0)$ 为亮度

差异 ($i - g_0$) 的符号值. 若用 α 描述当前像素点与其周围像素点的差异值, 当 $\alpha < 1$ 时, 设定一个噪声阈值以找出振幅中比噪声值小的数值, 当 α 比该阈值小时说明是噪声. 为防止放大或保留噪声, 当像素点 i 发现噪声时取 $f_{\text{detail}} = 0$, 目的是将噪声平滑掉. 类似地, 通过

$$r_{\text{big}}(i) = g_0 + \text{sign}(i - g_0) f_{\text{big}}(|i - g_0| - \sigma) \quad (2)$$

编辑强边缘. 其中 $f_{\text{big}}(x) = (1 - \beta)x$, $0 < \beta < 1$. 当 β 接近 0 时, r_{big} 实现了强边缘的保持; 当 β 接近 1 时, r_{big} 压缩了强边缘, 使其亮度变化变小. 此外, 对弱边缘的处理则通过

$$r_{\text{small}}(i) = g_0 + \text{sign}(i - g_0) f_{\text{small}}(|i - g_0| + \sigma) \quad (3)$$

实现. 其中 $f_{\text{small}}(x) = kx$, $k > 1$. f_{small} 实现了小边缘的增强处理, k 越大, 弱边缘被增强的程度越强.

改进前的拉普拉斯方法仅依靠 $(i - g_0)$ 值的大小判定像素点 i 处是边缘还是细节, 这种判定不能分离强边缘和弱边缘, 无法大幅度地凸显细节. 因为在这种机制下常将弱边缘识别为细节, 当细节增强较大时, 会导致比细节对比度更大的弱边缘被过度增强引起梯度翻转. 与改进前的拉普拉斯方法相比, 本文通过限定强边缘像素点数量 $\leq n_{\text{edge}}$, 可更准确地表示强边缘; 并通过分离弱边缘和细节实现了强/弱边缘与细节的分类处理, 从而在压制强边缘时, 小幅度增强弱边缘, 大幅度增强细节.

4) 对重映射处理后的图像构造其拉普拉斯金字塔和辅助金字塔. 其中, 拉普拉斯金字塔的每一层保存了图像下取样和上取样处理前后的差值, 如图 3c 所示. 首先通过高斯滤波和下采样计算高斯金字塔, 如图 3a 所示; 然后对每层高斯金字塔的结果进行上采样, 得到一个辅助金字塔, 如图 3b 所示;

最后利用高斯金字塔和辅助金字塔的差异计算拉普拉斯金字塔的每一层. 金字塔的层数 n 决定了图像

被处理的深度, 层数越多处理效果越好, 但处理时间会增大. 本文实验中, 设定 $n=4$.

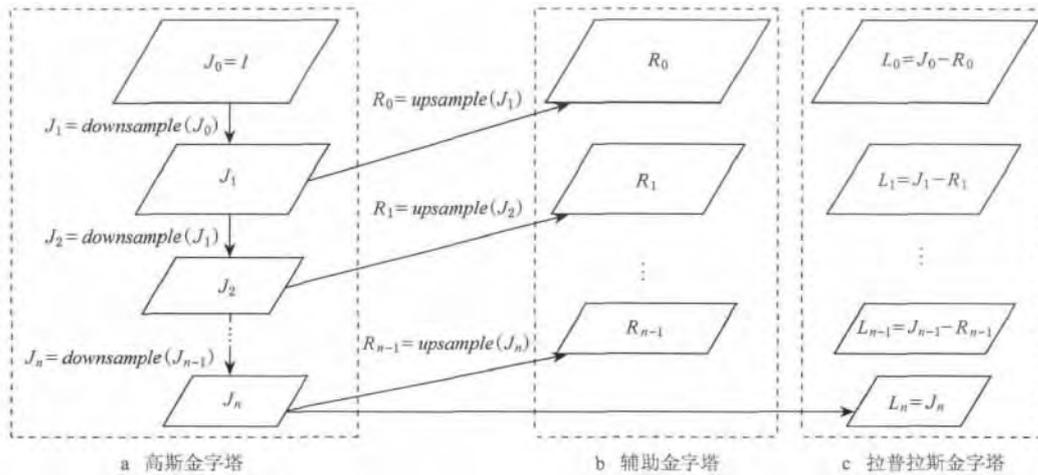


图 3 色调映射中的金字塔关系

5) 由于上述步骤皆不对底层高斯图像进行处理, 因此拉普拉斯金字塔的最底层 (如图 3 a 的 J_n 层) 保存了最原始的数据, 本文以该层数据为基础对图像进行重构处理. 对底层图像上取样, 再加上拉普拉斯金字塔对应层保存的差值得到上一层图像, 并将其作为下一次上采样的输入. 根据拉普拉斯金字塔的层数循环对图像上取样, 直至得到最顶层图像. 最顶层图像为图像分层编辑的结果.

6) 对分层编辑结果进行简单色调映射. 本文采用一个 γ 曲线, 使图像色调范围固定映射在 $0.5\% \sim 99.5\%$ 之间, 并设置比例因子, 以便输出的动态范围是 $100:1$ 的线性强度; 然后重新引入色彩值, 再通过一个简单的色调映射滤波器将图像中在 $[0, L_{\max}]$ 的值 (L_{\max} 表示图像亮度的最大值) 映射到可以显示的输出范围 $[0, 1]$ 中; 最后通过 γ 曲线进行反射处理, 将高动态图像正确地显示出来.

3 实验及结果分析

本文采用 Intel Pentium® T2370 1.73 GHz 和 2 GB 内存的 PC 平台进行实验. 设计图像分层数为 4 层, 处理一幅 (600×400) 分辨率的图像需要 130 s 左右, 其中下采样和上采样时的逐像素点滤波处理需要 80 s 左右, 占去大部分执行时间. 当图像分辨率增大、高斯金字塔层数增多时, 将延长处理时间. 为适应不同图像边缘和细节的区分度不同, 通过调整参数 α , β , σ 得到重映射的理想效果. 本文实验中设定 $\sigma=30$, $\alpha=0.25$, $\beta=0.01$. 本文从客观评价和主观评价两方面出发, 与现有高动态图像的处理方法 Durand 方

法^[1]、拉普拉斯方法^[12]、Fattal 方法^[14] 和 RD 方法^[15] 进行比较, 分析本文方法的有效性和可行性.

3.1 客观评价

近年来, 人们提出了多种色调映射的评价方法, 如基于图像结构改变的评价方法^[18], 基于对比度丢失的评价方法^[19], 基于视觉等价的评价方法^[20] 等. 其中, Aydin 等^[18] 提出的 DRIM (dynamic range independent metrics) 提供了一种动态范围可变的色调映射评价方法, 该方法通过对比映射前后图像结构的改变进行质量评价, 采用 3 种方式描述结构改变引起的差异, 能够细致而准确地评价图像质量. 因此, 本文采用 DRIM 方法进行客观评价.

DRIM 方法利用颜色编码描述色调映射前后的结构变化, 其中, 红色代表对比度反转, 绿色代表对比度丢失, 蓝色代表不可见对比度增加; 颜色的深度代表失真程度, 颜色越深代表失真越明显. 此外, 该方法以高动态图像作为失真判断的参照图, 能够比较准确、客观地反映失真情况.

1) 与改进前的拉普拉斯方法对比

图 4 所示为树木图像高动态处理的多种色调映射结果, 图 5 所示为对这些映射结果的 DRIM 客观评价. 对比图 4 b 与图 4 c 可以看出, 与改进前拉普拉斯方法相比, 本文方法能够更好地增强细节和弱边缘, 如图 4 b 中的树干部分; 对比图 5 a 与图 5 b 可以看出, 根据 DRIM 客观评价, 拉普拉斯方法在细枝、树叶处产生大量细节丢失 (如图 5 b 的绿色区域), 并引起局部梯度反转 (如图 5 b 的红色区域), 而本文方法不仅能够减少细节丢失降低梯度反转 (如图 5 a 中比较少的绿色和红色区域), 还能够增大

原高动态图像中的不可见对比度区域(如图 5 a 的蓝色区域),实现细节增强.这主要是因为本文方法通过将图像边缘分解到多尺度空间,并对描述物体

轮廓的强边缘和刻画图像细节纹理的弱边缘执行不同的映射处理,增强了映射结果中细节和弱边缘的对比度,从而得到了更有效的处理结果.

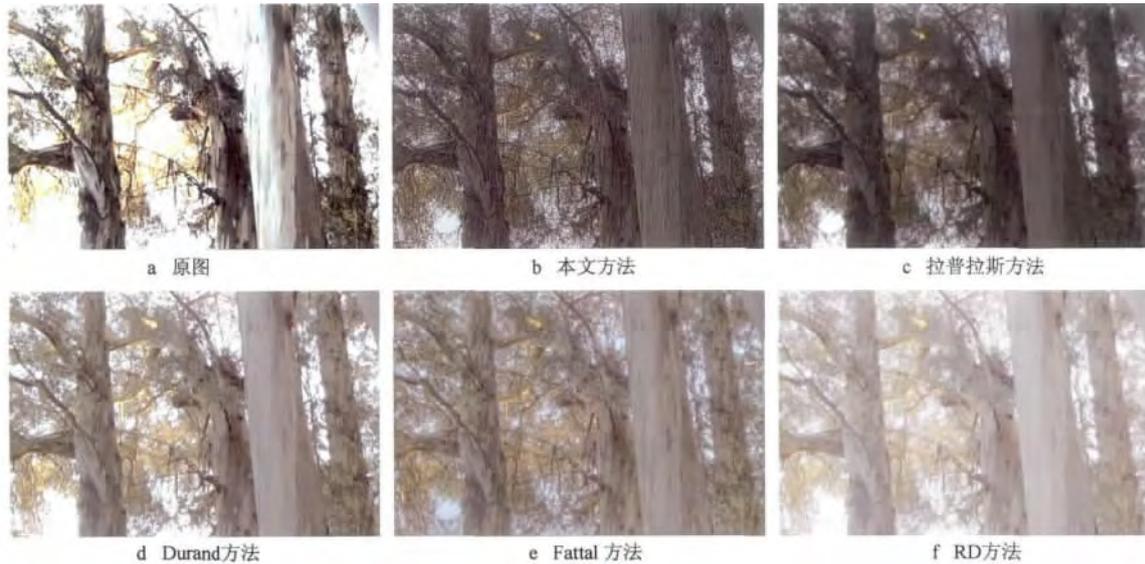


图 4 树木的色调映射效果图



图 5 树木色调映射的客观评价

2) 与其他色调映射方法相比
与多种当前高动态色调映射方法相比,本文方

法在提升细节内容、减少梯度反转方面同样比较有效.如图 6 所示,与图 6 c~6 f 所示的其他方法相比,

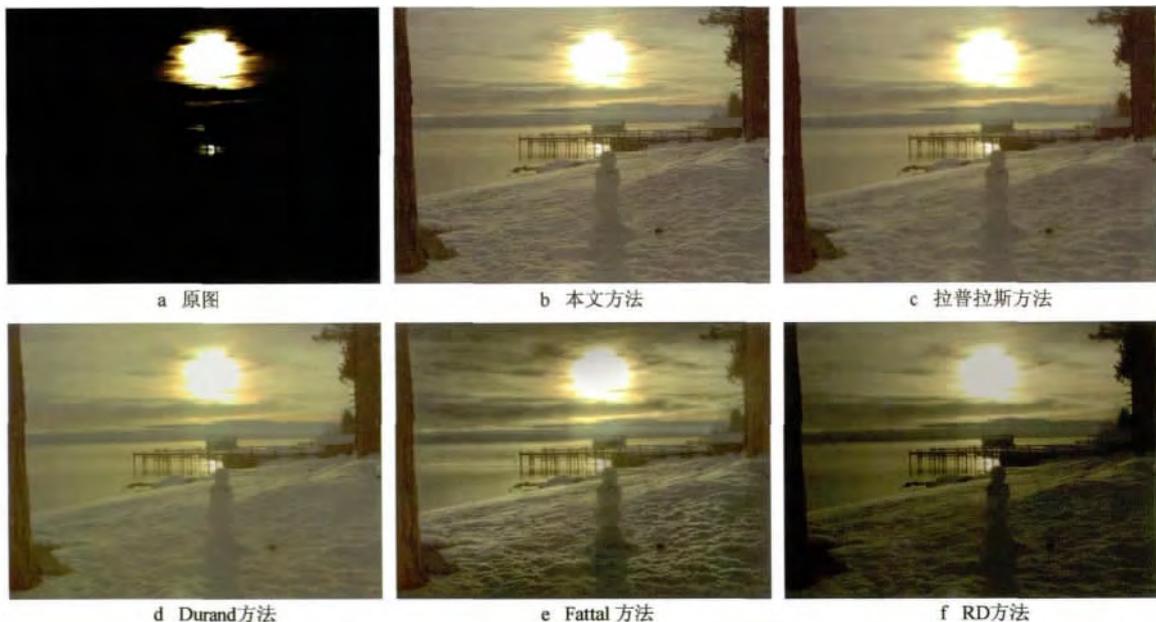


图 6 黄昏雪景的色调映射效果图

本文方法(如图 6 b 所示)能够更好地显示太阳周围云层和雪地表面的细节.对比图 7 可以看出,虽然本文方法在局部区域有少许梯度反转(如图 7 a 的红色区域),但相比图 7 b~7 e 中大量的细节或弱边缘对比度丢失(如图中的绿色区域),本文方法能够通过细节增强减少梯度反转和弱边缘衰退在全局范围

内的影响.其主要原因是本文方法通过拉普拉斯金字塔模型记录不同程度层面的细节和边缘变化,在逐层下采样和上采样的映射处理中能够渐进地控制细节、弱边缘和强边缘的变化.事实上,每层高斯金字塔内图像被映射时均可通过边缘和细节的分离自适应地变换图像内容,从而避免丢失过多细节.

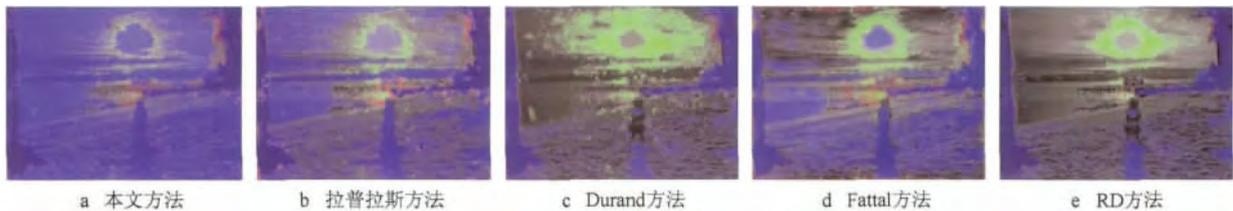


图 7 黄昏雪景色调映射的客观评价

3.2 主观评价

为了进一步评价本文方法的有效性,我们进行了主观评价验证.类似文献[21]的主观评价方法,本文首先选择当前文献中常见的 14 幅高动态图像作为输入,对每一幅图像计算其 5 种色调映射结果.这些结果分别根据本文方法、拉普拉斯方法、Durand 方法、Fattal 方法和 RD 方法实现;然后针对每一幅图进行主观评价;最后分析主观评价数据得到主观评价结果,如表 1 所示.针对任意一幅高动态图像的主观评价方法如下:1)从 27 位不同年龄用户中随机选择 5 位用户对一幅高动态的色调映射结果进行对比评价,主要对比本文方法与其他方法结果之间的优劣,评价结果分为比其他方法好、差或相似 3 种;2)针对每幅图像分析 5 位用户的评价结果,若存在 3 位用户选择一致(如均是比其他方法好),则以该结果作为此图的用户评价,若无法满足 ≥ 3 位用户意见一致时,则重新选择用户进行新一轮对比实验,直到得出该高动态图像的用户评价为止.

表 1 本文方法的主观评价结果

	好	相似	差
拉普拉斯方法	8	4	2
Durand 方法	10	3	1
Fattal 方法	9	2	3
RD 方法	12	1	1

由表 1 可以看出,在 14 幅图像的结果对比中,本文方法有 8 幅比拉普拉斯方法的效果好,有 4 幅与其相似,仅有 2 幅表现较差,这说明本文方法比拉普拉斯方法具有明显优势;此外,本文方法均有过半数图像(>7 幅)表现比其他 3 种方法好,说明根据主观评价本文方法比当前多种色调映射方法更有效.

4 总 结

本文提出一种改进拉普拉斯方法的高动态图像色调映射方法,其继承了拉普拉斯分层处理机制,主要创新是通过控制图像边缘数量,将图像中有对比度的区域分解为强边缘、弱边缘和细节,并针对这些区域分别提出不同的映射函数,以保证在重映射中强边缘处不存在梯度反转,同时弱边缘和细节能够被增强.本文方法首先根据高动态图像建立高斯金字塔;然后对金字塔的每层图像进行平滑处理以消除噪声;再根据当前层的平滑结果划分强边缘、弱边缘和细节,并分别对强边缘、弱边缘和细节进行映射;最后根据记录细节和边缘变化的拉普拉斯金字塔重构出色调映射结构.本文优化色调映射和细节增强的关键是将图像边缘分类处理和基于拉普拉斯金字塔的分层编辑结合在一起,使本文方法能够很好地处理不同层面的细节和不同强度的边缘,具有很强的适应性和灵活性.此外,本文还通过客观评价和主观评价验证了方法的有效性和优越性,大量评价结果证明,与当前多种色调映射方法相比,本文通过平滑每层图像消除了噪声,通过重映射增强了细节和弱边缘,通过重构保持了强边缘和丰富色彩,最终提供了一种能够更好地控制细节和色调变换的高动态图像重映射方法.

参考文献 (References):

- [1] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257-266

- [2] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D, *et al.* Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): Article No. 67
- [3] Xu L, Lu C W, Xu Y, *et al.* Image smoothing via L_0 gradient minimization [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): Article No. 174
- [4] Fattal R. Edge-avoiding wavelets and their applications [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): Article No. 22
- [5] 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
- [6] Su Z, Luo X N, Deng Z J, *et al.* Edge-preserving texture suppression filter based on joint filtering schemes [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(3): 535-548
- [7] Subr K, Soler C, Durand F. Edge-preserving multiscale image decomposition based on local extrema [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): Article No. 147
- [8] Bhat P, Zitnick C L, Cohen M, *et al.* GradientShop: a gradient-domain optimization framework for image and video filtering [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(2): Article No. 10
- [9] Hadwiger M, Sicut R, Beyer J, *et al.* Sparse PDF maps for non-linear multi-resolution image operations [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): Article No. 133
- [10] Tumblin J, Turk G. LCIS: a boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1999: 83-90
- [11] Zhu Wei, Liu Ligang. Tone-preserving colorization of black-and-white cartoon image [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(3): 392-398 (in Chinese)
(朱 薇, 刘利刚. 保色调的黑白卡通图像着色方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(3): 392-398)
- [12] Paris S, Hasinoff S W, Kautz J. Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No. 68
- [13] Fattal R, Agrawala M, Rusinkiewicz S. Multiscale shape and detail enhancement from multi-light image collections [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): Article No. 51
- [14] Fattal R, Lischinski D, Werman M. Gradient domain high dynamic range compression [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 249-256
- [15] Reinhard E, Devlin K. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(1): 13-24
- [16] Liu Hengsheng, Shen Jianbing. Tone mapping using intensity layer decomposition-based fast trilateral filter [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(1): 85-90 (in Chinese)
(刘衡生, 沈建冰. 基于亮度分层的快速三边滤波器色调映射算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(1): 85-90)
- [17] Shen J B, Zhao Y, Yan S C, *et al.* Exposure fusion using boosting Laplacian pyramid [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(9): 1579-1590
- [18] Aydin T O, Mantiuk R, Myszkowski K, *et al.* Dynamic range independent image quality assessment [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): Article No. 69
- [19] Mantiuk R, Kim K J, Rempel A G, *et al.* HDR-VDP-2: a calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No. 40
- [20] Ramanarayanan G, Ferwerda J, Walter B, *et al.* Visual equivalence: towards a new standard for image fidelity [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): Article No. 76
- [21] Liang Y, Su Z, Wang C T, *et al.* Optimized image retargeting using aesthetic-based cropping and scaling [J]. *IET Image Processing*, 2013, 7(1): 61-69