

基于局部环境亮度因子的 HDR 图像阶调压缩研究

朱明, 刘真, 杨丹丹

(南京林业大学, 南京 210037)

摘要: 由于处理位数的限制, 导致在常规设备上显示 HDR 图像必须对其进行阶调压缩。将图像局部环境亮度因子应用到了 HDR 图像阶调压缩中, 提出了基于局部环境亮度因子的 HDR 图像阶调压缩的具体算法流程, 并采用动态范围独立的图像评价模型, 对新算法性能进行了视觉定量评价。评价结果证明, 新算法的压缩效果较为明显, 也有效地降低了算法的复杂性。

关键词: 局部环境亮度因子; 阶调压缩; HDR

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)09-0085-05

Research on HDR Image Tone Compression Based on Luminance Factor of Local Environment

ZHU Ming, LIU Zhen, YANG Dan-dan

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Tone compression of HDR images is necessary for displaying HDR images on conventional device because of treatment capability restrictions. The luminance factor of local environment was applied in tone compression of HDR images. The specific algorithm workflow of the HDR image tone compression based on luminance factor of local environment was put forward. Quantified evaluation of the performance of the algorithm carried out with Dynamic Range Independent image quality model. The evaluation results showed that the new algorithm can achieve a good effect of tone compression for HDR images, and greatly reduce algorithm complexity.

Key words: luminance factor of local environment; tone compression; HDR

高动态范围 HDR 图像具有较强的场景动态范围表现能力, 在图像处理的相关领域中得到了广泛应用。但是, 处理位数的限制导致在常规设备上显示和输出 HDR 图像之前必须对图像进行阶调压缩处理。对 HDR 图像阶调压缩的研究, 应充分考虑人眼视觉特性, 尽可能使压缩前后图像在视觉效果上保持一致。鉴于人眼视觉对图像局部对比度较全局对比度更加敏感, 可以创建人眼视觉的局部感知适应模型, 对图像的局部对比度进行调整, 实现 HDR 图像的动态范围压缩。笔者主要研究的内容包括: 研究和分析图像局部环境亮度因子的推导原理, 并将其用于 HDR 图像的阶调压缩过程; 提出了基于局部环境亮度因子的 HDR 图像阶调压缩的算法流程, 利用边缘保持滤波将图像分解为包含图像轮廓信息的基础层

和包含边缘纹理信息的细节层, 然后利用局部环境亮度因子对图像基础层进行阶调压缩处理, 保持图像细节层不作处理; 采用动态范围独立 (DRI: Dynamic Range Independent) 的图像质量评价模型, 对 HDR 阶调压缩算法的场景再现准确性进行评价。

1 基于局部环境亮度因子的阶调复制函数

根据图像色貌模型的基本框架^[1], 当图像经过色适应变换后, 需要模拟人眼视觉系统的特性, 对图像进行阶调调整, 以确保阶调压缩后的图像在视觉上最大程度地与原始场景接近。由于人眼视觉系统对局部对比度比全局对比度更加敏感, 因此图像需要经过一系列局部阶调复制曲线 (local tone reproduction curves)

收稿日期: 2011-03-01

基金项目: 江苏省高校研究生科研创新计划资助 (CX09B_180Z)

作者简介: 朱明 (1983—), 男, 河南洛阳人, 南京林业大学在读博士生, 主要研究方向为图文信息处理、色彩信息复制和数字化印刷工作流程。

的调整。这些阶调复制曲线可以看作是图像局部环境和亮度变化对局部对比度所产生的视觉效应。

在传统色貌模型中,环境和亮度影响因子为单一的3个亮度条件(即较暗、黑暗和正常),但在图像色貌模型中,环境和亮度因子根据一个空间局限性(spatially localized)的“环境映射图”(surround map)进行推导和计算。该映射图是图像绝对亮度值 Y 的一个低通变换形式,低通滤波图像用于计算一系列阶调复制曲线。可以使用 CIECAM02 模型^[3]中的环境和亮度计算方法,式(1)为 CIECAM02 色貌模型中的 F_L 环境亮度因子的计算公式。可以使用一个“1.0/1.7”作为比例因子对该函数进行规范化,使该函数在亮度值为 1 000 cd/m² 时函数值为 1。适应场亮度 L_A 为图像绝对亮度 Y 值的低通变换形式,计算公式见式(2),其中 Image_Yfiltered 为图像绝对亮度 Y 值的低通滤波图像。 FFT 和 FFT^{-1} 分别代表傅里叶正反变换,Filter 代表低通滤波器,可以为高斯低通滤波核函数。

$$F_L = 0.2k^{0.4}(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (1)$$

$$\text{其中: } k = 1/(5L_A + 1)$$

$$L_A = 0.2 * \text{Image_Y}_{\text{filtered}} \quad (2)$$

$$\text{Image_Y}_{\text{filtered}} = FFT^{-1} \{ FFT \{ \text{Image_Y} \} FFT \{ \text{Filter} \} \}$$

F_L 环境亮度因子函数是根据图像中每个像素的邻域环境亮度计算而得,因此每个像素都由其对应的阶调调整曲线来进行处理。

2 算法流程

算法流程总体上基于图像色貌模型的处理框架,见图 1,图中的阶调压缩算子为笔者提出的基于局部

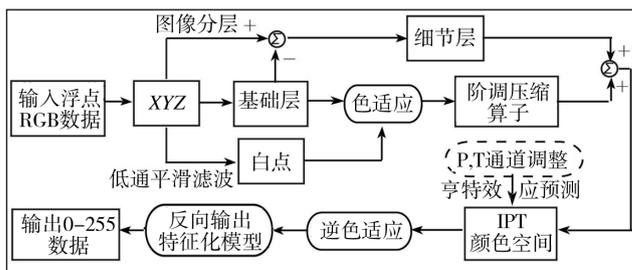


图 1 算法流程

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

环境亮度因子的 HDR 图像阶调压缩算法。流程中每个处理步骤的详细描述如下:

1) 高动态图像数据的读入和转换。

高动态范围图像使用 32 位浮点数来表示每个像素通道的亮度数据,每个像素需要 12 个字节的数据存储量;为了节省数据存储量,当前大多数图像处理应用程序都使用 RGBE 格式的高动态范围图像,此格式用 32 位来存储每个像素数据,即每个像素通道使用 1 个 8 位的尾数和 1 个 8 位的指数来表示,并且具有较强的可移植性。当处理程序读入 RGBE 格式的图像文件时,需要借助 ldexp 数学函数,将 RGBE 图像数据转换为与绝对亮度呈线性关系的浮点 RGB 数据,最后通过 sRGB 标准将其转换为 CIE-XYZ 数据,作为该算法流程的输入数据。

2) 图像分层。

用基于各向异性扩散的边缘保持滤波方法,将 XYZ 图像分解为基础层(对应图像的轮廓信息)和细节层(对应图像的边缘和纹理细节)^[2]。此算法流程中的色适应变换模块和阶调压缩模块,仅用于对图像的基础层进行处理,对细节层图像则不做任何处理。这种图像分层的思想,基于人眼视觉系统对局部对比度比全局对比度更加敏感这一假设,即压缩 HDR 图像的全局动态范围并保留其局部细节,可以在常规显示设备上复制出与原始场景相同的颜色外貌。

3) 基础层的色适应变换。

色适应变换需要借助 RGB 白点图像信号(源于图像中每个像素位置处的高斯低通滤波图像)来实现高动态范围场景的空间局部颜色适应;另外,由于“亨特色貌效应”预测是在 IPT 均匀颜色空间中进行,而该颜色空间是在 D65 标准光源观察条件下定义的。因此,该色适应变换也需要将图像全局白点转换到 CIE D65 光源观察条件下^[4-5]。

4) 基于环境亮度因子的阶调压缩。

将色适应后的 XYZ 色度值转换到 LMS 视锥颜色空间,见式(3)。然后使用环境亮度因子 F_L 的阶调复制函数,对图像每个像素的 LMS 响应值依次执行不同的非线性阶调压缩,见式(4),对 M 和 S 通道的压缩计算与此相同。阶调压缩完成后,再将 LMS 响应值转换为 XYZ 三刺激值。

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7075 & -0.0807 \\ -0.2280 & 1.1500 & 0.0612 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9184 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L' = L^{F_L} & L \geq 0 \\ L' = -|L|^{F_L} & L \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

5) 图像数据输出。

阶调压缩后,将基础层与细节层合并。然后将图像转换到 IPT 均匀颜色空间中,利用 F_L 亮度因子对图像彩度进行量化调制,实现对“亨特色貌效应”的预测。 P 和 T 通道值用于计算彩度 C ,见式(6),因此分别对 P 和 T 通道值进行亮度适应因子 F_L 的量化调制,调制函数见式(5),其中 c 为调制因子, F_L 因子中适应场亮度 L_A 的计算同样使用了图像亮度通道 Y 的低通滤波图像数据。当 F_L 因子不变时,调制函数的值随调制因子 c 的增大而增大,当 c 固定不变时, P 通道和 T 通道值同时随 F_L 单调递增,因此彩度值也随之增加。

$$P = P \cdot (F_L + 1)^c, T = T \cdot (F_L + 1)^c \quad (5)$$

$$C = \sqrt{P^2 + T^2} \quad (6)$$

6) 图像数据输出。

经过“亨特效应”预测后,将图像数据从 IPT 颜色空间转换回 CIE-XYZ 空间,然后再经过反向色适应变换(从 D65 到输出设备白点),反向颜色特征化(利用输出设备的 ICC 特性文件)和图像数据规范化(将浮点图像数据规范化至 $[0, 255]$ 的范围内)过程,将浮点 XYZ 图像数据转换为线性 RGB 图像数据。为提高图像的显示和输出质量,还需要对图像数据中的极高光和暗调像素进行裁切。

3 算法评价

采用动态范围独立(DRI)的图像质量评价模型对 HDR 阶调压缩算法进行评价。DRI 模型是在 HDR-VDP 模型的基础上,结合“图像相似性度量体系(SSIM)”进行改进而得,因此该模型能够很好地符

合人眼视觉系统的特性^[6]。但与 HDR-VDP 模型相比,DRI 模型的最大特色是能够借助不同的颜色通道(RGB),以最直观的方式显示 3 类结构性图像失真,非常方便用户查看图像失真发生的位置和获取图像失真发生的原因,进而指导阶调压缩算法的改进。DRI 模型最终输出一幅图像失真概率图,用于直观地预览原始 HDR 图像和阶调压缩后图像之间的失真。失真概率图的 RGB 3 个通道值用于表示 3 种类型的失真程度,像素每个颜色通道的饱和度值与该像素位置相应失真类型的探测概率数值成正比,绿色代表可视对比度的损失,蓝色代表不可视对比度的放大,红色代表可视对比度的逆转。

选择 10 幅具有不同亮暗调特征的 HDR 图像作为算法测试图像,见图 2。选择“直方图算法”,“摄影算



图 2 算法测试图像

Fig. 2 HDR images for algorithm test

法”,“自适应对数算法”,“双滤波算法”,“iCAM 算法”和“iCAM06 算法”作为阶调压缩性能的横向比较算法。本算法对以上 10 幅图像的阶调压缩结果见图 3,图中

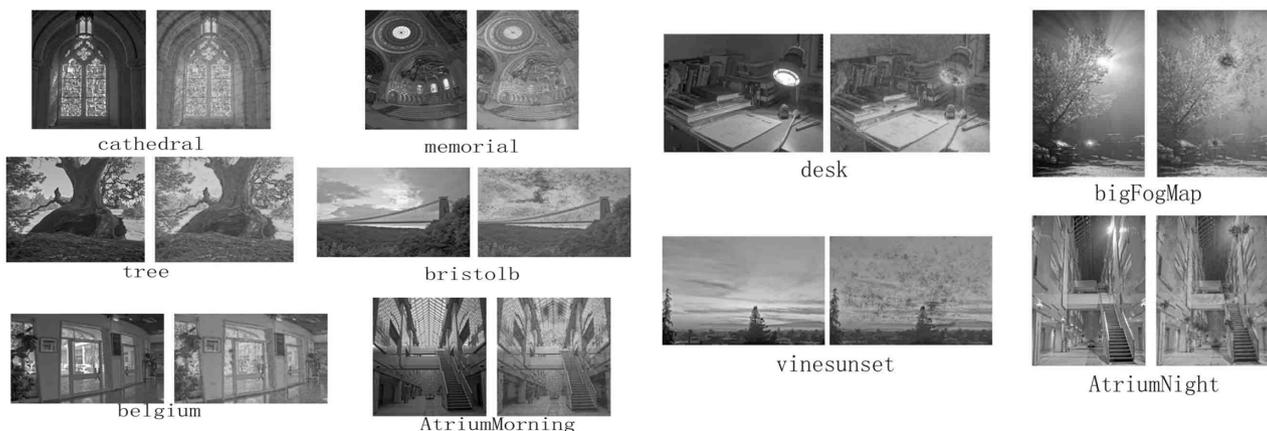
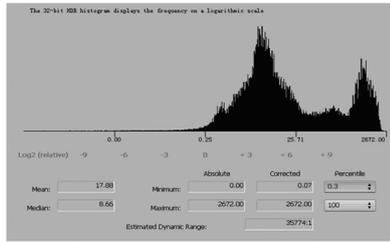


图 3 新算法的实验结果图像和对应的失真概率图像

Fig. 3 The result images of the new algorithm and the corresponding distortion maps

左边代表压缩后图像,其右侧代表相应的失真概率图。6种横向比较算法对图像“tree”和“bristolb”的阶调压缩结果以及相应的失真概率,见图4和5。通



tree. hdr 直方图



色调均化直方图



对数自适应



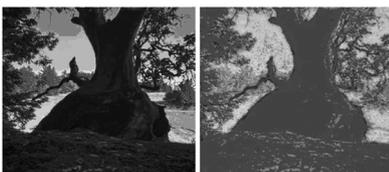
摄影



双滤波

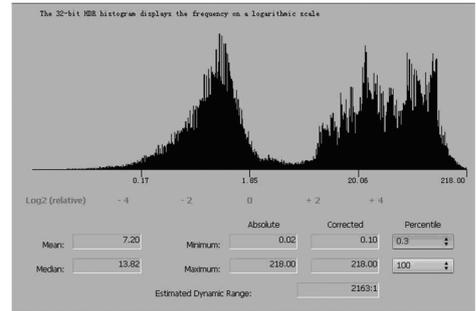


icam



icam06

图4 各种算法对图像“tree”的压缩结果
Fig. 4 The compression result images of “tree” by different algorithms



bristolb. hdr直方图



色调均化直方图



对数自适应



摄影



双滤波



icam



icam06

图5 各种算法对图像“bristolb”的压缩结果
Fig. 5 The compression result images of “bristolb” by different algorithms

察和比较每种算法压缩图像中的3类失真区域,可以明显发现:算法计算生成的失真概率图中,3类失真

颜色区域相对其他算法较小,证明算法能够较准确地实现 HDR 图像(真实场景)的再现,基本符合主观评价的结果^[7]。

4 结论

提出了一种基于局部环境亮度因子的 HDR 图像的阶调压缩算法,并使用人眼视觉模型的 HDR 图像阶调压缩定量评价模型,对算法场景再现的准确性进行了评价,评价结果表明:本算法对原始场景再现的准确性优于其他几种经典算法,且该算法的原理较为直观,复杂性较低,因此具有较高的执行效率。通过分析发现,提出的阶调压缩算法与图像处理中的基于非线性蒙版技术的局部对比度压缩具有相似形式^[8-9],从另一方面也证明了该算法的客观合理性。

参考文献:

[1] KUANG J, JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. iCAM06: a Refined Image Appearance Model for HDR Image Rendering [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(5): 406-414.

[2] 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.

[3] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. The iCAM Framework for Image Appearance, Image Differences, and Image Quality [J]. Electron Imaging, 2004(13): 126-138.

[4] KUANG J, YAMAGUCHI H, LIU C, et al. Evaluating HDR Rendering Algorithms [J]. ACM Trans Appl Percept, 2007, 4(2): 9.

[5] FAIRCHILD M D. Color Appearance Models [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

[6] AYDIN O, MANTIUK R, MYSZKOWSKI K, et al. Dynamic Range Independent Image Quality Assessment [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10.

[7] 杨丹丹, 刘真, 朱明. Photoshop CS3 中 HDR 图像的阶调映射算法的评价研究 [J]. 包装工程, 2010, 31(3): 101-104.

[8] ZHU Ming, LIU Zhen. A HDR Image Compression Algorithm Based on Non-linear Masking [J]. Advanced Materials Research, 2011, 174: 123-126.

[9] MORONEY N. Local Color Correction Using Non-linear Masking [C]. Proc of IS&T/SID 8th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, 2000: 108-111.

· 简讯 ·

“机电产品包装推广应用节材代木现场工作会议”拟在德阳东汽召开

为了深入贯彻国务院领导对机电产品包装节材代木工作的批示精神,倡导“减量化、低排放、再利用、资源化”的工作理念,工信部、中国包装技术协会机械工业包装技术委员会拟于 2011 年 5 月 19-22 日,在四川德阳东方汽轮机有限公司召开《机电产品包装推广应用节材代木材料现场工作会议》。会议将邀请发改委环资司、高技术司,财政部企业司、税政司,商务部、质检总局有关司局等国家相关部门领导,以及各重型机械、电工设备、机床工具、石化通用等行业单位主管生产和包装的领导参加。

东方汽轮机有限公司秉承“绿色动力,造福人类”的企业宗旨,通过技术创新求发展,卓越包装博信誉,着力打造具有东汽特色的包装品牌,是机电产品节材代木包装的发起和推动使用单位。东方汽轮机有限公司依靠技术进步,采用新技术,新包装工艺,使产品包装向更科学、更合理、更经济、更实用的方向发展,推广节约自然资源、有利于环境保护、有利于提高包装水平和包装质量的新型包装材料,大力推行机电产品包装“节材代木”。近 3 年,东方汽轮机有限公司平均每年节约木材 1 万~1.2 万 m³,约为 70 公顷森林的木材量。

这将是一个机电产品包装的盛会,相信通过这次会议,能够进一步推进装备制造业重点骨干企业“节材代木”包装的发展,为“十二五”的规划目标的实现奠定基础。

中国包装技术协会机械工业包装技术委员会
东方汽轮机有限公司
二零一零年五月三日