

文章编号:1001-9081(2007)04-0989-02

基于局部适应性的高动态范围图像显示方法

王家亮,顾耀林

(江南大学 信息工程学院,江苏 无锡 214122)

(jerrywang@yahoo.com.cn)

摘要:在高动态范围环境中,人眼依靠局部适应性也能够观察到细节变化。提出了一个基于区域信息的局部适应亮度计算方法来模拟局部适应性。使用区域生长法对图像进行分割,然后采用基于区域的双边滤波技术来计算每一像素的局部适应亮度,再联合色调映射算子获得可显示的低动态范围图像。实验结果显示,输出的图像避免了光晕,同时较好地保持了细节。

关键词:区域生长;双边滤波;色阶重建;高动态范围图像;辐射度图

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Method for displaying high dynamic range images based on local adaptive

WANG Jia-liang, GU Yao-lin

(School of Information Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: The visual system is able to perceive details in an environment with a high dynamic range by means of local adaptation. A region-based method for calculating local adaptation luminance was proposed to imitate the local adaptation mechanism. It segmented image with region growing. Then local adaptation luminance was computed via region-based bilateral filter. It outputted low dynamic range images in conjunction with tone mapping operator. The resulting images preserve details without halo artifacts.

Key words: region growing; bilateral filter; tone reproduction; High Dynamic Range (HDR) image; radiance map

0 引言

真实场景具有较广泛的亮度。例如,阴暗处的亮度约为 10^{-3} cd/m²,而太阳光直射下的场景亮度可达到 10^5 cd/m²,也就是此场景动态范围为 10 000: 1。人眼能够较好地适应这一高动态范围的变化。但是,一般 CRT 显示器的最大显示亮度约为 100cd/m²,即显示的动态范围约为 100: 1。色阶重建或色调映射的目的之一是将真实场景的高动态范围图像(High Dynamic Range Image, HDR)的动态范围压缩,生成可供显示设备显示低动态范围图像(Low Dynamic Range Image, LDRI)。一般要达到如下要求:

- 1) 动态范围的压缩,压缩后具有较好的全局对比度;
- 2) 压缩后的图像具有真实感,避免光晕等痕迹,较好地保持局部细节。

色阶重建算子(Tone Reproduction Operator, TRO)可分为两类:一是全局映射方法,它将整个图像视为一个整体,对每一像素使用同一映射因子。这类算子有:文献[1]通过真实场景观察模型和显示设备观察模型的匹配来计算图像的显示亮度,但此方法在高亮度或低亮度区域细节模糊;文献[2]提出了调整图像直方图的方法来进行观感上的色调映射,但对图像的细节保持不好。另一类是局部映射方法,它对图像的不同区域使用不同的比例因子进行映射,期望能够保持细节。该类算子有:文献[3]对基于 Retinex 理论的 McCann99 算法进行改进,改善了暗区的处理效果;文献[4]模拟摄影技术将图像依亮度分为不同的区域,再将 HDR 图像的各个区域映射到 LDR 图像的对应区域。文献[5]提出利用不同的像素分辨

率将图像划分成不同的区域而形成若干层,每一像素的局部适应亮度为所在区域的平均亮度,然后对所有层的亮度求平均值来获得该像素的局部适应亮度。该方法较好地避免光晕痕迹,保持了细节,但分层数较多时,计算消费较高。

本文提出了一种基于区域信息的局部适应亮度的计算方法。该方法首先使用区域生长方法将图像在亮度范围内分割成若干区域,然后使用基于区域双边滤波技术来计算局部适应亮度。最后,联合色调映射算子获得可用于显示的低动态范围图像。

1 局部适应亮度计算方法

由于视网膜对局部区域有较高的灵敏度,人眼能够观察到高对比度的场景。局部适应性使人眼在明亮和阴暗的区域仍然可观察到细节。人眼按物体与其背景照度的相对关系来判定物体的亮度。局部适应亮度计算是模拟人眼视觉系统(HVS)原理。本文使用区域生长方法对图像进行分割,每一区域由具有相似亮度的像素组成。然后,使用基于区域的双边滤波技术来计算适应性亮度。高动态范围图的亮度可在 YCbCr 色系域内由其 R、G、B 三基色使用 $I(R, G, B) = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.144 * B$ 式进行计算。然后,对亮度取对数,以下计算方法使用的亮度数值均为对数域内。

1.1 图像分割

本文使用图像分割的目的是将有显著亮度差异的区域分割开来,形成不同的区域,使得最终结果避免光晕的出现。图像分割方法主要有阈值分割、基于区域和聚类等方法。文献[6]给出了多个阈值计算方法。本文使用种子区域生长方法

收稿日期:2006-10-08;修订日期:2006-12-27

作者简介:王家亮(1977-),男,江西吉水人,硕士研究生,主要研究方向:图形图像处理;顾耀林(1948-),男,江苏无锡人,教授,主要研究方向:计算机图形图像处理,并行计算。

对图像进行预分割,然后依文献[7]的 EMD (Earth Mover's Distance) 相似性度量准则进行区域迭代合并。

文献[8]提出了一个种子区域生长算法,每一像素只需计算一次相似性度量,具有快速、鲁棒性好等特点。这里采用四邻域作为种子区域,其判定条件为:1) 邻域像素与种子像素亮度相似;2) 该种子连通像素数不小于图像像素总数的 0.1%。在区域生长过程中若有像素满足以上条件且其与邻域像素的平均距离小于该像素与区域间的距离时,则该像素邻域划分为独立的种子区域。对不满足这些条件的像素依种子区域生长算法合并到已有区域中去。设在分割过程中已有区域 A_1, A_2, \dots, A_n, T 为所有未处理像素且至少有一邻域内像素已经并入某一区域,即:

$$T = \{x \notin \bigcup_{i=1}^n A_i \wedge \exists k: N(x) \cap A_k \neq \emptyset\} \quad (1)$$

其中: $N(x)$ 表示像素 x 的 4 邻域。像素与区域的相似性度量为:

$$\delta(z, A_i) = |g(x) - \text{mean}_{y \in A_i}[g(y)]| \quad (2)$$

其中: $g(x)$ 为像素 x 的亮度值。生长过程中,选择一像素 $z(T)$ 及区域 $A_j(j \in [1, n])$, 使得:

$$\delta(z, A_i) = \min_{z \in T, k \in [1, n]} \{\delta(z, A_k)\} \quad (3)$$

区域生长停止条件为: $\delta(z, A) > TH$ (TH 为阈值)。

区域的合并过程中依 EMD 相似性度量准则进行区域迭代合并。线性规划中的运输问题是 EMD 的具体应用,文献[7]将其作为图像检索中图像间距离的相似性度量准则。本文使用特征矢量来表示区域,将区域亮度范围均分成 3 组, m_i 表示第 i 组的平均亮度值, w_i 表示第 i 组像素数与区域像素总数的比例,所以区域的特征矢量为 $((m_1, w_1), (m_2, w_2), (m_3, w_3))$ 。对于区域 P, Q , 其 EMD 距离计算方法如下:

$$d_{EMD}(P, Q) = \frac{\min \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 |m_i - m_j| * f_{ij} \right)}{\min \left(\sum_{i=1}^3 w_{p_i}, \sum_{i=1}^3 w_{q_i} \right)} \quad (4)$$

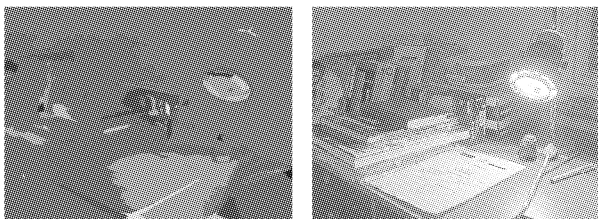
其中: i, j 分别表示区域 P, Q 的特征向量元素下标; f_{ij} 表示区域 P 中的第 i 组像素搬运到区域 Q 第 j 组 ($j = 1, 2, 3$) 的那部分像素权重, EMD 问题求解也就是要得到最佳的 f_{ij} 系列使得 EMD 距离最小; w_{p_i}, w_{q_j} 分别表示为区域 P 第 i 组、 Q 第 j 组的 w 分量值; (4) 式隐含的约束条件为:

$$f_{ij} \geq 0, 1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 3 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^3 f_{ij} \leq w_{p_i}, 1 \leq i \leq 3 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 f_{ij} = \min \left(\sum_{i=1}^3 w_{p_i}, \sum_{i=1}^3 w_{q_i} \right) \quad (7)$$

合并过程按照区域亮度大小顺序依次进行,当两相邻区域的 EMD 小于阈值 δ 时进行合并。图 1 显示了 Desk 图像的分割结果以及最终输出的低动态范围图像。



(a) 图像分割后的结果(伪彩色表示) (b) 本文方法输出的LDR图像
图 1 Desk 图像分割结果与输出的 LDR 图像对比

1.2 基于区域的双边滤波

双边滤波同时考虑由像素位置关系形成的空域和由像素

值关系形成的值域范围内进行滤波,在过滤噪声的同时保持边界及纹理细节^[9]。本文提出了一种基于区域的双边滤波方法,使用基于区域的双边滤波方法来计算像素的局部适应亮度,对于图像的任一点 (x, y) , 其局部适应亮度为:

$$L(x, y) = \frac{1}{Z_{x,y}} \sum_{(i,j) \in \Omega} G_{x,y}(i, j) K_{x,y}(i, j) I(i, j) \quad (8)$$

其中:

$$G_{x,y}(i, j) = \exp\{-((i-x)^2 + (j-y)^2)/(2\sigma_s^2)\}$$

$$K_{x,y}(i, j) = \exp\{-((V(x, y) - V(i, j))^2)/(2\sigma_r^2)\}$$

$$Z_{x,y} = \sum_{(i,j) \in \Omega} G_{x,y}(i, j) K_{x,y}(i, j)$$

$I(i, j)$ 为像素点 (i, j) 在对数域内的亮度; $V(i, j)$ 为像素点 (i, j) 所在区域的平均亮度。

在计算像素的局部适应亮度时,区域间的像素的影响可由 σ_r 调节,可取 $\sigma_r = 0.2$ 。而 σ_s 可设置为大于 1° 视觉场,可取为图像像素大小 1% ~ 4%。由此,我们所得像素的最终局部适应亮度 L_d 可由对数域内的值 L 获得,即 $L_{da} = \exp(L)$ 。

2 色调映射

色调映射的目的就是要获得可供低动态范围显示设备显示的低动态范围图像。本文方法后期映射采用文献[10]的改进 T-R 映射算子,该算子使用基于人眼视觉系统的数学模型——观察者模型,通过将真实场景的观察者模型与显示设备的观察者模型匹配来获得映射关系。算法输入上节计算所得的局部适应亮度和辐射度图像的 R、G、B 值,输出为动态范围图像的 R、G、B 三基色值。计算方法如下:

T-R 算子真实场景的观察者模型与显示设备的观察者模型匹配等式为:

$$(S_w - 27)(8.4 - R_w) = (S_d - 27)(8.4 - R_d) \quad (9)$$

其中: S_w, S_d 分别为真实场景和显示设备的观察者模型背景明亮度; R_w, R_d 分别为真实场景和显示设备的观察者模型背景亮度反射率。

由式(5)可计算显示设备的观察者模型背景亮度反射率 R_d , 则低动态范围图像的映射亮度 L_d 可按式计算:

$$L_d = \frac{L_{da} * 10^{-0.1 * R_d}}{L_{dm}} \quad (10)$$

其中: L_{da} 为显示环境亮度,一般为 $25 \text{ cd/m}^2 \sim 35 \text{ cd/m}^2$; L_{dm} 为显示设备最大显示亮度,一般 CRT 显示器约为 100 cd/m^2 。

再由辐射度图像的每一基色与亮度的比例乘以映射亮度 L_d 即可获得映射后低动态范围图像的各基色值。

3 实验结果

实验中输入的高动态范围图像为辐射度图像 (Radiance RGBE 格式)。在图像分割算法中,使用自顶向下的伸展树来存储区域的候选像素。它只需 $O(1)$ 的辅助空间,却保持了 $O(\log N)$ 的摊还时间界。每一区域的候选像素使用伸展树数据结构来组织,且该区域最优候选像素存储于一个优先队列中。在同一候选区域,具有相同亮度的像素以 FIFO 队列存储在同一节点中。经实验,图像初始分割的阈值 TH 约为 0.3, 合并过程中 EMD 距离阈值 δ 约为 0.6。实验步骤如图 2 所示。

图 3 显示了三种不同方法所生成的 Price Western Hotel LDR 图像。其中,图 3(a)为本文方法结果, σ_s 为图像大小的

(下转第 1029 页)

商、员工、产品、供应商和时间等。其中,产品除了可以做单一产品分析外,还应能按产品分类进行分析。而生产厂商、员工、供应商都是单一个体,可以不必向上合并成为较大的单位,对单一的生产厂商、员工和供应商来分析即可。时间是维度数据,它具有先天的层次关系,公司的需求是以年、季度和月份来进行分析的,对每一个员工、每一类产品、每一个供应商和每一个生产厂商做质量分析时,就上述因素作年度、季度及月度质量分析,并以图形、表格的方式支持决策者进行决策即可。但是如果模型库中的相关模型参数不能进行微调的话,是难以做到这一点的。以 Windows 2000、SQL Server 2000 (含 Analysis Service) 作为数据库管理平台, Powerbuilder 8.0 和 Excel 2000 作为开发工具即可以开发基于知识仓库、模型仓库及数据仓库的决策支持系统,该系统可以根据时间维度的变化以及不同员工、不同产品和不同厂商的特点自动对原有模型库中的相关模型进行参数修改。同时,调用方法库中的方法,通过联机分析处理即可得到诸如图 3 所示的图表。决策者可以通过这些图表知道质量问题严重的部门,针对这一问题,通过该决策支持系统进一步分析该问题产生的原因,

并根据提供的支持结合自己的经验作出决策。

参考文献:

- [1] CHEN SC, ZHU YL, ZHANG DQ, *et al.* Feature Extraction Approaches Based on Matrix PaRem: MatPCA and MatFLDA [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(8): 1157 - 1167.
- [2] 高素芳, 张继福, 张素兰. 决策支持系统结构框架的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(23): 195 - 197.
- [3] 顾忠伟, 陈珊珊. 知识仓库及其在决策支持系统 (DSS) 中的应用研究 [J]. 科技进步与对策, 2003, 20(10): 94 - 96.
- [4] 吴应良, 吴海平. 一种基于知识仓库的决策支持体系结构模型 [J]. 软科学, 2004, 18(4): 4 - 8.
- [5] FOSTER I, KESSELMAN C. The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure [M]. 2nd Edition. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 2004.
- [6] 王曙燕, 耿国华, 周明全. 数据仓库与数据挖掘技术的研究与应用 [J]. 计算机应用研究, 2005, 22(9): 194 - 205.
- [7] 罗书强, 何玉林. 网络化制造模式下的质量管理决策支持系统 [J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2004, 2(10): 172 - 175.

(上接第 990 页)

1%, $\sigma_r = 0.2$ 。图 3(b) 为文献 [6] Yee 方法的结果。图 3(c) 为直接截取低动态范围 (此范围外采用色彩饱和方法) 的结果。从实验结果看, 本文方法图像较好地避免了使用基于 Retinex 理论方法易出现的光晕, 具有较好的全局对比度, 同时保持更丰富的细节。高亮度处的云彩和低亮度处的树丛的细节获得了较好表现。

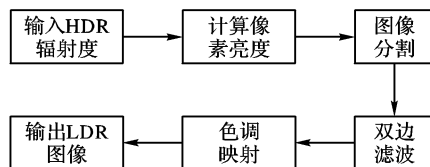
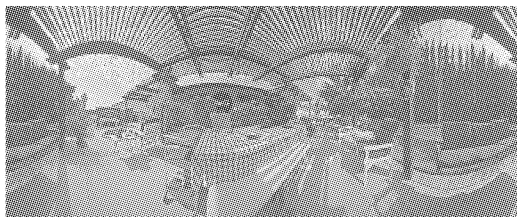


图2 本文 HDR 处理方法的步骤



(a) 本文方法的处理结果



(b) Yee方法的处理结果



(c) 直接截取(色彩饱和)低动态范围的结果

图3 Price Western Hotel 图像的三种方法结果比较

4 结语

提出了一种有效的高动态范围图像局部适应亮度计算方法。该方法基于图像分割, 依像素的亮度将图像分割成不同的区域, 然后使用基于区域的双边滤波技术计算像素的局部适应亮度。实验结果表明, 本文方法能够较好地避免了光晕, 同时保持了图像的细节。但图像的明亮区域处理后稍偏暗, 色调映射算子还需进一步完善。

参考文献:

- [1] TUMBLIN J, RUSHMEIER HE. Tone reproduction for realistic images [J]. IEEE Computer Graphics Application, 1993, 13(6): 42 - 48.
- [2] LARSON GW, 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.
- [3] 顾耀林, 袁雪庚. McCann99 算法的改进 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(12): 1523 - 1528.
- [4] REINHARD E, STARK M, SHIRLEY P, *et al.* Photographic tone reproduction for digital images [A]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002 [C]. San Antonio, Texas, 2002. 267 - 276.
- [5] YEE YH, PATTANAIK SN. Segmentation and adaptive assimilation for detail-preserving display of high dynamic range images [J]. The Visual Computer, 2003, 19(7): 457 - 466.
- [6] 付忠良. 一些新的图像阈值选取方法 [J]. 计算机应用, 2000, 20(10): 13 - 15.
- [7] 王文惠, 王展, 周良柱, 等. 一种测量图像相似性的新方法 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(16): 87 - 90.
- [8] ADAMS R, BISCHOF L. Seeded region growing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(6): 447 - 466.
- [9] TOMASI C, MANDUCHI T. Bilateral filtering for gray and color images [A]. Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Computer Vision [C]. Bombay, India, 1998. 839 - 846.
- [10] TUMBLIN J, HODGINS JK, GUENTER BK. Two methods for display of high contrast images [J]. ACM Transactions on Graphics, 1999, 18(1): 56 - 94.