

文章编号: 0253-2239(2009)11-3050-07

基于 Sigmoid 函数局部视觉适应模型的真实影像再现

肖蔓君 陈思颖 倪国强 温焱

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 为解决图像采集与显示设备之间的动态范围差异,色调映射技术试图建立一种由高到低的动态范围映射关系,可用于一般图像的真实影像再现。在不同亮度适应水平下,人眼能产生不同的响应特性及对比度敏感性,从而同时响应不同明暗的光强。由此建立了一种局部视觉适应的再现算法,采用具有参数控制的 Sigmoid 函数来模拟视觉适应的 S 形非线性特点,得到不同局部亮度适应水平下的压缩曲线,因此能较好地协调图像整体对比度、亮度调整与局部增强之间的关系,在增强图像较暗区域的同时,极大程度地保持亮区细节。经主观评价与特征统计参数相结合的方法验证,该算法能有效地实现动态范围压缩,保持图像细节而避免伪像,具有一定的色彩恒定性,且复杂度低,具有很好的实用性。

关键词 图像处理;真实影像再现;色调再现;视觉适应;高动态范围;Sigmoid 函数

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3050

Tone Reproduction Method by a Local Model of Visual Adaptation Based on Sigmoid Function

Xiao Manjun Chen Siying Ni Guoqiang Wen Yan

(*Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,*
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract In order to solve the dynamic range gap between image acquisition and display devices, tone reproduction algorithms are used to generate a visually similar mapping of input luminance to display luminance, which can be imported to realistic image rendition for ordinary images. The task is similar to visual adaptation processes in human visual system. Under different adaptation levels, human eyes have different contrast sensitivity and adaptation mechanisms to cope with high dynamic range scenes, where both too bright and too dark regions contained. So a realistic image rendition method by a local model of visual adaptation is proposed in this paper. The S-shape nonlinear mapping relationship is simulated by parameters controlled Sigmoid function, and its adaptive compression curves are achieved corresponding to various lightness adaptation levels. The method effectively keeps the balance between the wholly tone and luminance and local contrast, and enhances the visibility in dark region and keeps the detail in too bright region at the same time. Subjective assessment with objective featured statistical values is applied in the paper, it's approved that the method can effectively achieve high dynamic range compression, enhance image detail without artifacts, and it's computationally efficient and easy to use.

Key words image processing; realistic image rendition; tone reproduction; visual adaptation; high dynamic range; Sigmoid function

收稿日期: 2008-10-18; 收到修改稿日期: 2008-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(10602009)资助课题。

作者简介: 肖蔓君(1981—),女,博士研究生,主要从事基于视觉特性的图像处理与真实影像再现技术方面的研究。

E-mail: xiao.manjun@gmail.com

导师简介: 倪国强(1946—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电成像器件/技术/系统/应用、图像处理及高速实现、自由空间光通信技术等方面的研究。E-mail: nigq@bita.org.cn

1 引言

自然场景呈现在人类眼前的是丰富的色彩与广泛的亮度,如夜晚的平均亮度约为 10^{-6} cd/m²,日照条件下甚至可达到 10^8 cd/m²,而在单一场景中的亮度就可能跨越好几个数量级^[1]。人类视觉系统能够适应的光强范围很宽,从夜视阈值到强闪光约有 10^{10} 量级。通常,人眼能在给定的视适应条件下,分辨出 10^4 量级范围内的细节信息,而仅仅在闪光周围出现光晕而丢失细节^[2]。人类视觉具有如此高的动态范围,是当前通用显示设备所无法比拟的。

高动态范围(HDR)图像的获取是伴随着照明仿真、多重曝光摄影技术与传感器技术的发展而不断推进的。目前,结合更高级别(如 12/14 bit)模数转换芯片的数码相机已经面市,可达 4~6 个对数单位的动态范围,但相较于人眼的感知范围还有相当大的差距。一种利用常规相机拍摄的方法是事先采集同一场景在不同曝光量下的图像以合成一幅高动态范围图像^[3]。这类图像捕捉到更为完整的光照情况,因此被广泛应用于增强现实、图像建模,以及电影特技、视觉系统模拟、卫星遥感等众多领域^[4]。但常用的显示设备(如 LCD、LED)的动态范围仍然非常有限,通常仅达 1~2 个数量级^[5];而投影、打印等方式能呈现的动态范围更低。图像采集与显示动态范围的不匹配,往往会导致在显示过程中图像信息的丢失,特别是在图像暗区与亮区的信息就更难以分辨。因此,研究图像动态范围压缩,就是通过对图像动态范围的缩放,使其适于观察的同时,保持或增强原始图像的某些特性,如图像亮度、对比度、色貌及细节可见性等,又被称为色阶重建(TR)或色调映射(TM)技术。

色调映射问题的研究较早由 Tumblin 与 Rushmeier 提出^[6],随后在图形图像处理领域迅速展开。这一研究思路亦非常适用于低动态范围图像的真实影像再现(RIR)技术,即通过合适的映射关系实现图像增强、色彩恒定的处理效果。

随着近年来对人类视觉系统研究的不断进步,人们对自身视觉系统结构、视觉形成机制以及视觉电生理反应等的了解逐渐成熟,真实影像再现算法从纯数学推导发展到结合视觉感知特性的研究范围。无疑地,视觉研究成果的仿真建模有可能为其提供更为可靠的参考。而根据再现过程是否考虑像素邻域内的对比影响,算法可分为全局法和局域法两类。

本文根据人类视觉适应具有的 S 型特点,提出

了一种利用 Sigmoid 函数作为图像映射关系的局部适应方法。其中 Sigmoid 函数的参数控制取决于局域背景亮度,能有效依据不同区域的亮度条件而自适应选择,针对亮、暗区域应用非线性映射曲线,有效地增强图像细节,保持图像色彩的真实感,算法复杂度低,取得了较好的实验效果。

2 真实影像再现与视觉适应

真实影像再现(色调再现)或动态范围压缩的问题,可以看作图像反射率的再现问题^[7]。

一般地,图像 $I(x, y)$ 被视为场景内物体反射率与环境光照的乘积^[8],即

$$I(x, y) = R(x, y)L(x, y), \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$, $L(x, y)$ 分别表示在点 (x, y) 处的反射率和光强。前者是物体表面属性决定的,真实场景中由于反射率本身而产生的图像对比度差异不太可能超过 $100^2:1$,因此光照变化是导致高动态范围图像强大表现力的原因。理论上讲,动态范围压缩就是将图像 I 的反射率 R 与光照强度 L 分离,通过对 L 施以一定的映射策略,使之缩放到另一较低光照范围 \tilde{L} ,从而得到了新的动态范围图像

$$\tilde{I}(x, y) = R(x, y)\tilde{L}(x, y) \quad (2)$$

而映射策略的确定需要保证图像纹理和反射率对比度不会丢失,同时降低图像亮区或暗区的对比度。

事实上,这种由高动态范围向低动态范围的映射关系与人类视觉系统的视觉适应机制类似。

人类视觉系统具有不同的适应机制,易于在很大的亮度范围内成功地解决输入与输出动态范围差异问题。由视神经元构成的神经网络结构,被称作视网膜,其光学结构对输入视觉信息进行提取和预处理,正好包括了这两方面的要求。其一,输入动态范围大;其二,后续视神经通道能容纳的信息处理能力有限^[9]。因此,视网膜通过不同敏感性神经元与各种适应机制,在实现动态范围控制的同时,还针对更高层次的视觉处理提取相应特征。

研究表明,“适应”现象最早也主要发生在视感受器层,包括视锥与视杆细胞,同时水平细胞、无长突细胞提供了侧向联接、双极细胞辅以末梢联接^[10]。目前根据不同的电生理研究结论,研究者提出了各种人造视网膜的计算模型来描述这一复杂的人类视觉形成过程,其中对视锥与视杆细胞响应特性的研究结论更为丰富。这些都有可能为影像再现技术提供更具可靠性的建模依据。

3 基于 Sigmoid 函数的局部视觉适应算法

3.1 算法理论

图 1 是人类视觉系统的阈值-强度(TVI)曲线,显示了视锥、视杆响应阈值随输入光强的变化,即在给定亮度适应水平下人眼恰可察觉亮度差值不同。在一幅图像中,其亮度适应水平也是变化的,即所谓的局部适应现象^[11]。影像再现算法旨在对一幅图像不同的局部亮度适应水平建立合适的响应模型:在低亮度适应水平区域,模型的响应阈值小,视敏度高,能分辨较多纹理、细节信息;在高亮度适应水平区域,图像纹理信息得以保证,模型进入 TVI 线性区域,对色彩的要求变得突出。

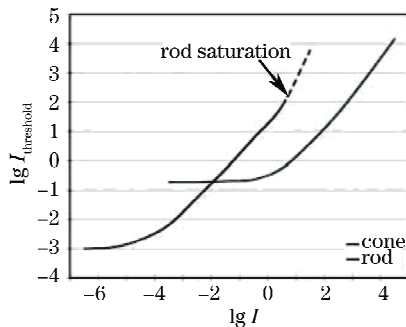


图 1 阈值-强度(TVI)曲线

Fig. 1 Threshold vs. Intensity curve

普遍观点认为,视觉适应具有 S 形状的非线性特点。Naka 和 Rushton^[12]较早地提出了一种视锥、视杆的适应模型,后被进一步总结为亮度感受模型^[13],如(3)式所示

$$R(I) = \frac{I^n}{(I^n + \sigma^n)}, \quad (3)$$

式中 R 为细胞响应, I 为输入亮度, σ 为半饱和参数(即当响应达到系统一半时的参数),而 n 为敏感度常数。 σ 的不同代表了不同的适应水平。

其后有关视觉适应模型的研究,很多是围绕如何确定局部适应水平的深入讨论。文献[9]利用 Michaelson-Menton 饱和函数解析了视感光色素漂白作用与视神经回路尤其是水平细胞反馈作用,这是两种主要的亮适应机制。文献[10]则通过对比度和亮度控制参数,对不同图像选取合适的适应曲线。文献[14]进一步加强了亮度不均匀图像中适应水平的自适应选择。实际运用常出现的问题是,同时存在亮区与暗区的图像,很容易实现暗区有效增强,但往往亮区增益过大而导致纹理、细节信息丢失;图像色彩丰富程度与图像清晰度之间,也存在一定的折

中取舍问题。

本文根据视觉适应的 S 形特点,采用了在神经网络分析中常用的 Sigmoid 函数加以模拟,其形式为

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp[-\xi(x - \eta)]}, \quad (4)$$

其特点可概括为:在平衡位置附近的一个适当邻域内,函数与自变量的关系是基本线性的;而在这一领域以外,函数与自变量为非线性的,并趋向于一个极限;参数 ξ 、 η 可对函数实施一定的伸缩和平移,以适应于不同具体问题的需要。

结合视觉感受机制的亮度适应原理^[10, 12]模拟光感受器的响应输出,有

$$\frac{v_r(I)}{v_{\max}} = \frac{I^n}{I^n + \{I_s \exp[-\alpha(\lg I - c)]\}^n + \beta}, \quad (5)$$

式中 $v_r(I)$ 为光感受器输出电位,范围是 $[0, 1]$, v_{\max} 为其最大输出电位, I 为输入强度刺激, I_s 为局部背景强度, $n \approx 1$, α , c 分别为对比度和亮度控制因子, β 为偏移量常数,以免产生奇异点。 $I_s = I * G(I)$ 由输入强度的低通滤波得到,本文采用高斯滤波器计算,从而得到了由图像局域光强决定的背景强度,再配合 α , c 两个控制因子,就能判定图像各区域的局部适应水平,确立不同形状的压缩曲线。

为保证图像输出效果,将(5)式输出结果通过适当的后处理流程:

- 1) 直方图剪裁算法,去除两端部分像素值;
- 2) 将输出结果输入到 HSV 空间,对饱和度分量作自适应调整。

3.2 参数讨论与修正

图 2 给出了随 α 、 c 值的变化所得到的不同适应水平下,由(5)式模拟的输入与输出亮度之间的映射关系。为简化曲线绘制,取 $\beta = 0$ 。其中同种颜色的曲线随输入强度增加向右平移,此时 α 固定, c

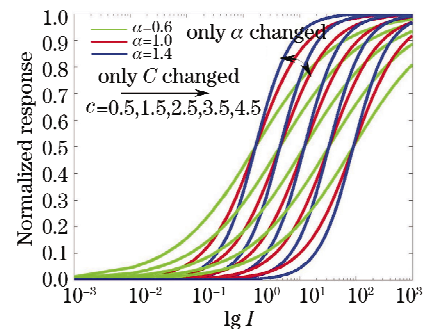


图 2 α 、 c 值对输入强度与输出关系的影响

Fig. 2 Mapping of input luminance to receptor responds with different parameters

控制了输出亮度水平；一组颜色的曲线代表在 c 一定的条件下， α 控制了对比度映射关系。从曲线分布来看，文献[10,12,15]中通常仅考虑曲线平移，或者仅反映曲线缩放关系；因此本文基于 Sigmoid 形式构造的模型能更全面地提供输入图像与不同设备显示范围的映射关系。

在 RGB 空间进行影像再现计算，配合后处理过程设置不同的参数组合处理，原图如图 3 所示。由于图 3 的色彩、信息丰富，同时包含了亮区和暗区，尤其暗区细节在低动态范围显示设备上很难呈现，因此非常适合于影像再现算法的测试，下一节将进行

一步利用图 3 讨论相关评价。当 $\alpha \in (0.1, 1.9)$ ， $c \in (2, 5)$ 得到的效果如图 4 所示。



图 3 待处理的原图
Fig. 3 Original image

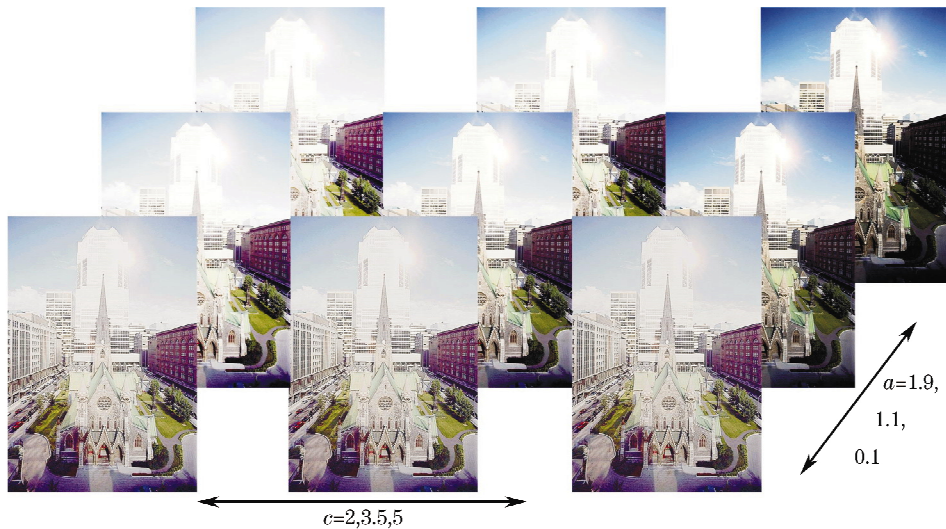


图 4 不同 α, c 组合的处理结果

Fig. 4 Results with different paraments

由图 4 易知，选取较小的亮度控制因子 c ，图像整体亮度明显增加，特别是在亮区过曝光现象明显；反之亮度降低，暗区难以分辨图像信息。对比度控制因子 α 较小时，动态压缩能力强，特别是暗区的细节得到极大程度增强，但色彩表现力差；反之，动态范围压缩能力差，色彩保真性好。

参数选取的矛盾，会导致图像中不同亮度区域的纹理或色彩信息损失。根据主观测试结果来看，图 4 中 $\alpha = 1.0, c = 4.5$ 时取得了相对满意的综合效果，但由于任一 α 和 c 组合仅代表某确定背景强度下的一条影像再现曲线。

若进一步设计控制因子与局部输入强度的关系，就能强化局部适应水平的确立，使之根据局部区域的实际情况（如亮度、对比度增强或色彩保持需要等）修正图 2 的压缩曲线。因此，将局域背景强度 I_a 转换到 HSV 空间，得到其局域亮度，令 α, c 均与之具有线性关系，即

$$\alpha = mv_a + n, \quad (6)$$

$$c = m'v_a + n', \quad (7)$$

式中 v_a 是 7×7 邻域的背景强度在 HSV 空间得到的亮度值， m, n, m', n' 分别确定 α 与 v_a, c 与 v_a 之间的线性关系。本文对大量图像反复实验，给定参数如 $m = 0.4, n = 1.2, m' = 0.3, n' = 5, \beta = 12$ 时能获得主观测试的最佳效果，图 3 处理结果如图 5(a) 所示。其中主建筑体上部的高亮区、蓝天白云以及图片右部楼房、下部拱形门等位置的亮度、对比度都得到有效调整，且整体色调更接近对原图色彩的预期结果。由于不同显示器动态范围及对色差的反映有区别，可作相应参数选取，本文参数在 Philips 107S6 CRT 上通过主观测试获得。

4 算法对比与评价

4.1 与其他算法的比较

为检验本文算法的影像再现能力，本节进而与几种较成熟的算法加以对比，包括：

1) RGB 空间的图像均衡化算法,如图 5(b)所示。

2) D. J. Jobson 与 Z. Rahman 提出的包含色彩复原的多尺度 Retinex(MSR)算法^[16],该算法后被美国 Truview 公司采用,开发了专利软件产品 PhotoFlair^[17],效果如图 5(c)所示。(由于该图为试用版处理效果,图样上包含“DEMO”字样)

3) 一种改进的视锥适应的影像再现算法^[14],如图 5(d)所示。

图 5 显示以上几种算法都具备一定的影像再现能力,但效果有所差别。总体来说,图像暗区增强效

果较好的是图 5(a),(d),特别是对原图右侧建筑的增益控制较好,较其他两种方法更能分辨图像信息;图 5(a),(c)很好地把握了中间白色建筑上部的过曝光亮区控制,极大程度地保留了该区域的信息;从全局色调来看,图 5(a),(c)比较真实地反映了图像的丰富色彩,图 5(b)存在色偏,而图 5(d)图像过亮而发白。在原始大小时对比各算法,可以更清楚地观察到本文处理效果在细节增强、色彩再现各方面,较其他算法具有更好的处理效果。

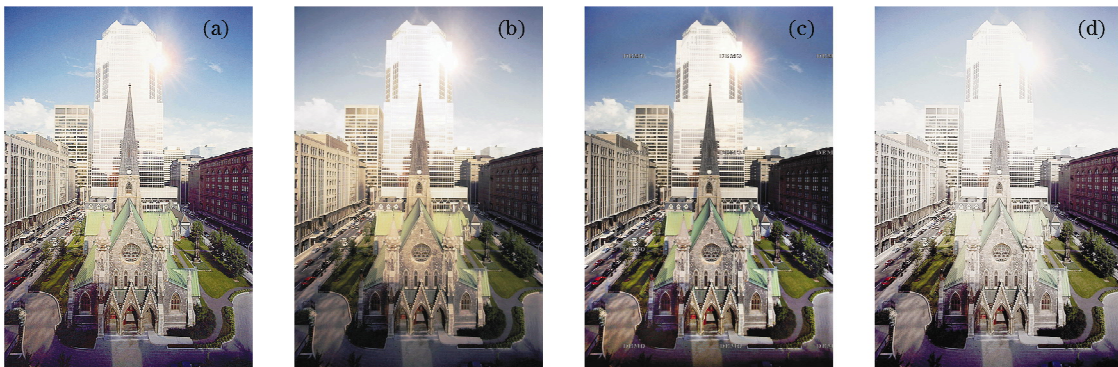


图 5 不同算法的处理效果。(a)本文算法;(b)RGB 均衡化算法;(c)Photoflair 软件的 MSR 算法;(d)一种视锥适应算法

Fig. 5 results of different methods. (a)our algorithm; (b)RGB histogram equalization;

(c)MSR by PhotoFlair; (d)a cone adaptation method

4.2 客观参数评价

如何评价真实影像再现算法的优劣是研究的难点,常规的做法是采用主观评价,但由于主观情绪、喜好的差别可能导致评价结论差异大,因此用主观方法来再现效果需要进行大样本的测试,费时费力。一般地,可以认为一幅视觉效果好的图像应当具备适中的场景亮度,丰富的图像特征和真实的色彩效果。D. Jobson 等^[18]在研究 MSR 算法的同时,亦实验讨论了视觉效果优秀的图像是否具备特有的图像统计值特征。研究表明,一幅视觉效果好的图像是具有一定的统计特征的:其一,图像亮度反映在图像均值变化上;其二,丰富的特征信息对比,可以用图像标准差来体现对比度差异。实验测得,主观评定的视觉效果好的图像,其均值围绕在 128 附近,而标准差至少在 35~40 以上,不具备收敛性,即标准差越大,图像对比度越高。

直接计算全局统计参数会降低标准差对图像对比度的反映程度,因此本文将图像分为不重叠的若干区域块,分别计算各块均值 I_i 和标准差 σ_i ,即代表块明度值和块对比度,而总明度、总对比度由它们的平均值 \bar{I} 和 $\bar{\sigma}$ 获得。表 1 列举了用上述几种算

法对图 3 处理结果的统计参数。从表 1 可以发现,几种算法都能明显提高图像明度,但对比度改善能力不等。从客观统计参数的对比来看,本文设计的方法具有更好的再现能力,这与上一小节的主观评价结果是一致的。

表 1 不同算法结果的统计参数

Table 1 Statistical value of different methods

Algorithm type	Overall lightness (overall mean)	Overall contrast (overall standard)
Original image (Fig. 3)	95.332	25.587
Our method [Fig. 5(a)]	133.051	37.022
RGB histogram equalization [Fig. 5(b)]	125.886	27.855
MSR by PhotoFlair [Fig. 5(c)]	115.670	35.465
A cone adaptation method [Fig. 5(d)]	150.171	33.890

图 6 是运用本文算法对其他若干图像的处理结果,可见基于 Sigmoid 函数的亮度局部适应方法对大多数图像具有普适性,尤其对于图像中同时存在过曝光亮区或暗区的图像能够很好的兼容考虑不同亮度区域的再现需求,增强图像细节,色调真实,且不会附加“光晕”,“白化”等效应,算法复杂度低。

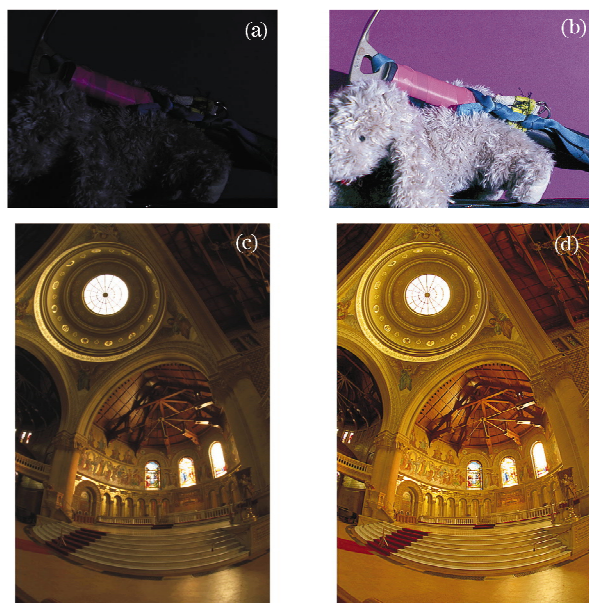


图 6 本文算法应用于不同场景图像。(a),(c)原图;(b),(d)处理效果

Fig. 6 Results of different images. (a), (c) original images; (b), (d) results

5 结 论

根据人类视觉适应具有 S 形、非线性、局部性的特点,即对一个场景中的不同光照条件,视觉响应对应于不同的亮度适应水平,从而光感受器呈现不同的视敏感度及阈值特性,本文设计了一种基于 Sigmoid 函数的亮度局部适应真实影像再现方法。实验表明,该方法运算速度较快,能应用于大多数光照条件下的图像,动态范围压缩能力强,这一点在包含较多亮区或暗区对比的图像中得到充分体现。算法能增强图像细节,目视效果佳,且施以边缘检测算子时,也发现大大增加了检测到的细节,这对于某些应用场合的彩色图像目标识别与检测工作十分有利。

但算法对任意图像是否适用还有待全面实验考量,在此基础上进一步研究水平细胞和双极细胞等在视觉适应过程的侧向连接作用,以及改善过曝光亮区与邻近区域的配合处理,是一个重要的研究方向。

本文采用主观评价与客观统计参数相结合的方法对算法效果加以评判,这是就再现效果的典型特征(如明度、对比度)采用客观标准评定的一些尝试。如何客观有效地评价真实影像再现方法仍然是研究的难点,特别是如何考察图像的色彩再现能力还有待进一步探索。

参 考 文 献

1 Patrick Ledda, Luis Paulo Santos, Alan Chalmers. A local model

of eye adaptation for high dynamic range images[C]. *ACM, Proc. of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africab*, 2004, 151~160

2 <http://aris-ist.intranet.gr/documents/Tone%20Mapping%20and%20High%20Dinamic%20Range%20Imaging.pdf>

3 Paul E. Debevec, Jitendra Malik, Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]. *Proc. of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1997, 369~378

4 Hua Shungang, Wang Lidan, Ou Zongying. Constructing high dynamic range image based on photographs with different amounts of exposure[J]. *J. 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

5 S. Pattanaik, H. Yee. Adaptive gain control for high dynamic range image display [C]. *ACM, Proc. of the 18th Spring Conference on Computer Graphics*, 2002, 83~87

6 J. Tumblin, II, Rushneier. Tone reproduction for realistic images[J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1993, 42~48

7 R. Fattal, D. Lischinski, M. Werman. Gradient domain high dynamic range compression[J]. *ACM Trans. on Graphics*, 2002, 21(3): 249~256

8 Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Hu Hongqing et al.. New progress and prospect of realistic image rendition based on visual characteristics[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, 34(4): 451~460

倪国强,肖蔓君,胡宏清等. 基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 451~460

9 Samir Shah, Martin D. Levine. Visual information processing in primate cone pathways-part I; A model [J]. *IEEE Trans. On System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 1996, 26(2): 259~274

10 Erik Reinhard, Kate Devlin. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology[J]. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(1): 13~24

- 11 P. Moon, D. Spencer. The visual effect of non-uniform surrounds[J]. *J. Opt. Soc. Ame.*, 1945, **35**: 233~248
- 12 K. L. Naka, W. A. H. Rushton. S-potentials from color units in the retina of fish[J]. *J. Physiol.*, 1966, **185**: 536~555
- 13 Z. Xie, T. G. Stockham. Towards the unification of three visual laws and two visual models in brightness perception[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989, **19** (2): 379~387
- 14 Huang Guanghua, Ni Guoqiang. A realistic image rendition method based on the cone adaptation model[J]. *J. Image and Graphics*, 2007, **12**(7): 1161~1167
黄光华,倪国强. 一种基于视锥适应模型的真实影像再现方法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(7): 1161~1167
- 15 Sumanta N. Pattanaik, Jack Tumblin, Hector Yee. Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display[C]. *Proc. 27th ACM Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2000, 47~54
- 16 D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell. A multi-scale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. *IEEE Trans. on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, 1997, **6**(7): 965~976
- 17 <http://www.truview.com/>
- 18 D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell. Statistics of visual representation[C]. *SPIE*, 2002, **4736**: 25~35