

一种基于视锥适应模型的真实影像再现方法

黄光华 倪国强

(北京理工大学光电工程系光电成像与信息工程研究所,北京 100081)

摘要 鉴于常见的色调再现算法或者参数过多,或者空间常数过大,使其工程应用受到限制,为此,提出了一种基于视锥细胞适应模型的影像再现算法。在该模型中,视锥细胞转换函数的半饱和常数随着输入强度的变化而变化,而半饱和常数与其色素半漂白常数的相对比例关系保持不变,以便符合色素漂白与神经反馈对视锥适应的相对作用关系。通过大量实验仿真,并与其他方法处理结果的比较发现,该模型具有以下特点:①能够有效突出图像亮区和暗区的细节,且动态范围压缩性能较好;②能够在很大程度上减弱色调再现领域经常出现的“光晕”效应;③能够避免 retinex 模型和对抗神经网络等模型带来的“白化”现象;④处理结果的色调偏离真实景物的程度较低,其颜色恒定性能较好;⑤在计算背景光强时由于所用模板尺寸很小,因而速度远远快于常见的算法。该方法有望应用到实时性要求较高的工程领域。

关键词 Naka-Rushton 方程 动态范围压缩 色调再现 光晕效应 白化现象

中图分类号: TP391.41 TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)07-1161-07

A Realistic Image Rendition Method Based on the Cone Adaptation Model

HUANG Guang-hua, NI Guo-qiang

(Section of Photoelectronic Imaging & Information Engineering, Department of Photoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract A cone adaptation model based method for realistic image rendition is proposed after analysis of the disadvantages of several tone rendition algorithms. In this method, the half-saturation constant of the original cone cell transduction function varies with input intensity, while the ratio between the half-saturation constant and the half-pigment bleach constant of the function is kept invariant to be in accordance with the effects of pigment bleaching and neural feedback on cone adaptation. Many simulation results and comparison between this method and some other tone reproduction algorithms show that this method can illustrate good performance of dynamic range compression while keeping color constancy, greatly reduce the “halo” artifacts frequently occurring in the field of tone reproduction, and avoid the “graying out” effects brought about by models such as the retinex and the opponent neural network. Since the convolution kernel used for computation of the ambient intensity is of very small size, its computational speed is far exceeding that of some classical image rendition methods and it may be used in some real-time applications.

Keywords Naka-Rushton equation, dynamic range compression, tone reproduction, halo effect, graying out effect

1 引言

众所周知,在人类视网膜中存在视锥细胞和视杆细胞等两套形状各异的光感细胞。其中,视杆细胞对

光强特别敏感,能在亮度为 10^{-6} - $10\text{cd}/\text{m}^2$ 的暗光条件下为人眼提供暗视觉感知,即能产生无色视觉;视锥细胞则不如视杆细胞敏感,它在亮度为 0.01 - $10^8\text{cd}/\text{m}^2$ 的亮光条件下才能为眼睛提供彩色视觉感知^[1]。由于人眼能响应的照明亮度范围高达 14 个

基金项目:国家自然科学基金项目(60377038)

收稿日期:2005-12-26;改回日期:2006-04-26

第一作者简介:黄光华(1976~),男,北京理工大学博士生,目前主要从事基于生物视觉特性的图像处理与图像融合研究,E-mail: tjzh_1976@163.com 或 tjzh1976@sohu.com

对数单位,远远超过目前对亮度最敏感的视频摄像机只有4~6个对数单位的动态范围^[2],并且通常的图像显示设备的亮度范围仅达2个数量级^[3],这自然促使人们展开有关人类视觉系统工作机制的研究,并且逐渐出现了许多基于视觉生理特性,尤其是视觉适应特性的图像增强、色调再现的报道^[1-8]。

由于视觉系统的复杂性以及视觉特性的多样性,目前还没有出现能将所有视觉特性进行综合的色调再现算法。上述不同的色调再现算法的主要区别在于它们将观察实际景物所得的印象与观察显示图像所得的印象进行匹配时所采用的标准不同或者强调的视觉特性不同。具体说来,Tumblin等人提出的算法^[5]是建立在明度匹配的基础上;Ferwerda等人提出的算法^[1]则综合了视觉适应对于阈值、色调、锐度及敏感性随时间变化的影响;Larson等人提出的算法^[6]是建立在可见性、明度、对比度与颜色等匹配的基础上;Pattanaik等人提出的算法^[7]则根据心理物理学实验结果认为,Naka-Rushton方程中的半饱和常数和响应幅度均为亮度与时间的函数,并据此建立起时间依赖视觉适应模型。

在色调再现领域,另一个比较著名的模型是Land等人提出的retinex模型及其各种改进版本^[9-14],其出发点是视觉系统的明度响应由景物的反射率决定。Rahman,Jobson等人仔细研究了中心-环绕结构的retinex改进模型的基础上,从对数函数的位置、环绕函数(surround function)的选取、环绕区域空间常数的大小、显示之前retinex模型输出的处理等4个方面确定了retinex模型在图像处理上的正确表现形式,并且对retinex模型进行了多尺度扩展,其在颜色恒定性、动态范围压缩以及颜色再现等方面得到了比较理想的结果^[12-14]。

Pu等人则从Grossberg等人的中心-环绕并联神经网络(center-surround shunting neural networks, CSSNN)动力学方程出发^[15-20],得到了原始图像的双对抗神经元输出,并对其进行了多尺度扩展,同时综合考虑了神经元的输出显示、整流函数的作用、颜色复原函数等多种因素^[21]。仿真结果显示,该模型的图像颜色真实再现的视觉效果比较令人满意。Pu等人指出,当衰减常数很大时,其模型与retinex模型本质上是一样的。

需要说明的是,人类视觉系统的亮度响应范围虽然比普通的人造设备的响应范围大得多,但是它并不是十全十美的。例如,当外界光强减弱时,视觉

锐度将逐渐减小,而当外界光强增强时,对比度敏感性也将逐渐降低;视觉适应,尤其是暗适应是个漫长的时间过程,如果严格以此为依据,那么将根本得不到能够实时处理的模型。上述多数算法由于过分拘泥于视觉现象的生理学或心理物理学背景,因此要么算法过于复杂,实用性不高;要么引入明显的瑕疵,使图像质量大为降低;要么使图像变得模糊,增强效果反而并不显著;或者采用的空间常数相当大,使时间复杂度大为增加,难于实时实现。

本文针对上述算法的种种不足,提出了一种基于视锥适应模型的影像再现算法。该算法力求达到以下几个目标:(1)算法复杂度和时间复杂度均大为降低,从而可能应用于实时性要求较高的图像处理场合;(2)具有较好的动态范围压缩性能,且对图像亮区和暗区的信息均有所增强,同时可保留中等亮度区域的细节;(3)不引入诸如光晕等瑕疵,并具有较大程度的颜色恒定性能。

2 基于视锥适应模型的真实影像再现算法

2.1 视锥适应模型

前面曾经提到,人眼能够响应的照明范围高达14个对数单位,但是由于组成视觉系统的单个神经元本身的响应范围却仅约1.5个对数单位^[1],而视锥的动态范围也只有3个对数单位^[2],因此视觉系统中必然存在复杂的适应机制,其可通过调节神经单元的响应特性来适应外界光照的变化,以保持对于外界目标的正确感知。此即所谓的明度恒定性。

文献[4]指出,只有感光细胞、水平细胞和双极细胞参与了明度恒定性处理过程。研究表明,在视觉处理的早期阶段,至少存在如下3种亮适应机制^[2,4]:①亮度变化引起瞳孔直径的变化;②外界光照引起感光色素的消耗(即漂白);③来自视网膜神经回路尤其是水平细胞层的反馈作用。由于瞳孔直径在2~8mm之间变化时,仅仅引起视网膜照度1个对数单位的变化^[7],且对视觉适应的影响较小,因而本文将不予考虑。3种亮适应机制中,色素漂白的结果将降低视觉系统的敏感性,其程度正比于漂白色素的含量;而神经反馈机制的作用则是通过迅速调节感光细胞响应曲线的工作点来对完全超极化感光细胞的膜电位进行去饱和^[4]。两种机制的综合结果,使得在外界光发生局部或全局变化的情

况下,视觉系统仍然保持较高的对比度敏感性。

文献[2]给出的视锥细胞转换函数类似于 Naka-Rushton 方程:

$$v_r(I) = v_{max} \frac{I^n}{I^n + \left(\frac{k_r}{k_b} I_a + k_r\right)^n} \quad (1)$$

式中, v_r 为感光细胞电位; v_{max} 为感光细胞最大电位; I 为输入刺激强度; n 为响应曲线陡峭度; k_r (下角 r 代表 receptor) 为半饱和常数; k_b (下角 b 代表 bleach) 为色素半漂白常数; I_a (下角 a 代表 ambient) 为外界光照水平或背景强度。仿照 retinex 模型中对各颜色通道独立进行明度计算的做法,本文在对彩色图像进行处理时,亦将视锥细胞转换函数分别应用于各颜色通道,并采用如下公式计算背景强度:

$$I_a(x, y) = I(x, y) * G(x, y) \\ = \sum_p \sum_q G(p, q) I(x - p, y - q) \quad (2)$$

式中, $G(x, y)$ 为归一化常数为 K 、空间常数为 c (本文取为 1) 的高斯模板:

$$G(x, y) = K \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{(2c^2)}\right) \quad (3)$$

归一化常数 K 满足:

$$\sum_x \sum_y G(x, y) = 1 \quad (4)$$

在不同背景下,函数 $v_r(I)$ 随输入强度而变化的曲线如图 1 所示。

文献[2]在推导其视锥通道信息处理模型的过程中,综合考虑了视锥间的耦联作用、色素漂白的过程、光照对神经元受域尺寸的影响、光照对背景强度的影响、内丛层细胞对于水平细胞的反馈作用

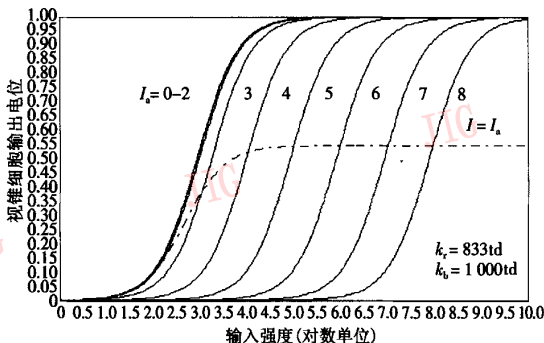


图 1 不同背景下视锥响应随输入强度变化而变化的曲线

(图中虚线表示输入强度等于背景强度时的视锥响应)

Fig. 1 Cone response as a function of input intensity at different backgrounds

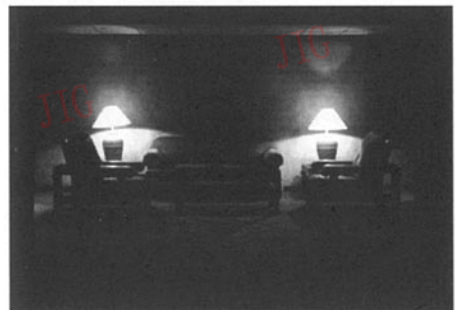
(The dashed line denotes the cone response with input intensity equal to background)

等因素。虽然这些因素真实地反映了视网膜层视锥通道的信息处理过程,但是从图像处理的角度来看,其最终图像效果却未必最好。举例来说,如果考虑视锥间的耦联作用以及光照对于神经元受域尺寸的影响,则无疑将会降低原始图像的分辨率。

文献[2]给出式(1)的各参数值为 $n \approx 1.0$, $k_r = 833td$, $k_b = 1000td$ (在后续公式中, k_r 和 k_b 的取值均与文献[2]相同)。其图像处理结果如图 2 所示。由图 2 可见,式(1)的图像增强效果并不明显。



(a) 原始图像



(b) 式(1)的处理结果

图 2 低照明水平下的原始图像以及应用式(1)的处理结果

Fig. 2 An original image at low light level and its processed result by eq. (1)

2.2 改进的视锥适应模型

为了改善图像处理的质量,同时又借鉴视锥适应机制,本文将从下述方面着手,即调节 k_r 的大小,同时保持 k_r 与 k_b 间的比例关系不变,以符合色素漂白与神经反馈对视锥适应的相对作用关系。文献[7]指出: Naka-Rushton 方程中的半饱和常数和响应幅度均为亮度与时间的函数。根据输入强度 I 调节 k_r 的大小,即认为 k_r 与输入强度有关,这点虽与文献[7]的做法一致,但是本文将维持响应幅度的大小不变,以保持或提高输出的局部对比度。

首先考察 k_r 的影响。为清楚起见,将式(1)重

新写成

$$v_r(I) = v_{\max} \frac{I^n}{I^n + \left(\frac{k_r}{k_b} I_a + \sigma\right)^n} \quad (5)$$

在式(1)中,对于 8bit 图像而言,由于 $k_r \gg I$ 及 $k_r \gg I_a$,因此 $v_r(I) \propto I^n$,此即图 2 中增强效果不明显的原因。为此,本文考虑式(5)中 σ 接近输入强度 I 与 I_a 的情况。图 3 给出了 σ 取不同值时的 8bit 图像处理结果。由图 3 显然可见:当 σ 取值较小时,图像暗区部分的增强效果最佳,但图像亮区部分的处理效果最差;而当 σ 取值较大时,图像亮区部分的处理效果较好,但图像暗区部分的增强效果很差。一种自然的改进方法就是对 σ 取不同值时的处理结果进行加权平均,这样将可取得在图像亮区和暗区均有所增强的折衷效果。本文则从另一个角度出发,使式(5)中的参数 σ 自适应地随输入强度的变化而变化。具体而言,令

$$c = aI^m / (I^m + \beta^n) + b \quad (6)$$

式中, β 为半饱和常数,取为 2^{D-1} (D 为图像的位

深),它对应于平均输入强度; a 为比例常数;指数 m 用来调节 c 随输入强度 I 变化而变化的速度; b 为偏置量。则式(1)变成

$$v_r(I) = v_{\max} \frac{I^n}{I^n + \left(\frac{k_r}{k_b} I_a + \beta \cdot c\right)^n} \quad (7)$$

需要说明的是,式(7)中 c 的确定方法并不惟一。此处施加的约束条件有以下 2 个:(1) 当背景强度给定时, v_r 是输入强度 I 的 S 形单调递增函数,这样即可保证改进模型在形式上仍然符合视锥细胞转换函数关系;(2) 当输入强度 I 等于背景强度时, v_r 是输入强度 I 的单调递增函数,以避免在结果中出现灰度与对比度反转现象。式(7)的处理结果如图 4 所示。显然,比较图 3(a) 和图 4(b) 可知,式(7)对图像的亮区和暗区均有明显的增强效果;比较图 2(a) 与图 4(a) 亦可看到,式(7)不仅能在很大程度上降低微弱光照的影响,还能突出场景中的目标、纹理等信息。借助于作图法,并经过大量反复的实验,本文确定的式(7)的参数取值如表 1 所示。

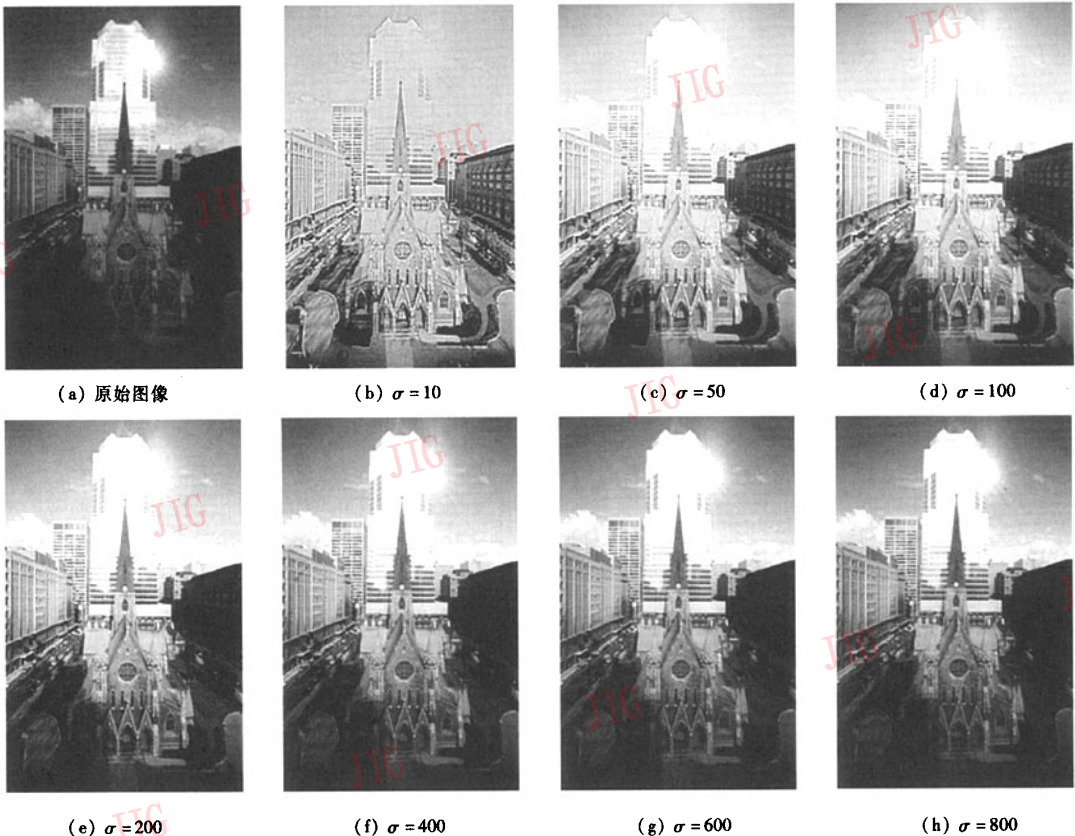
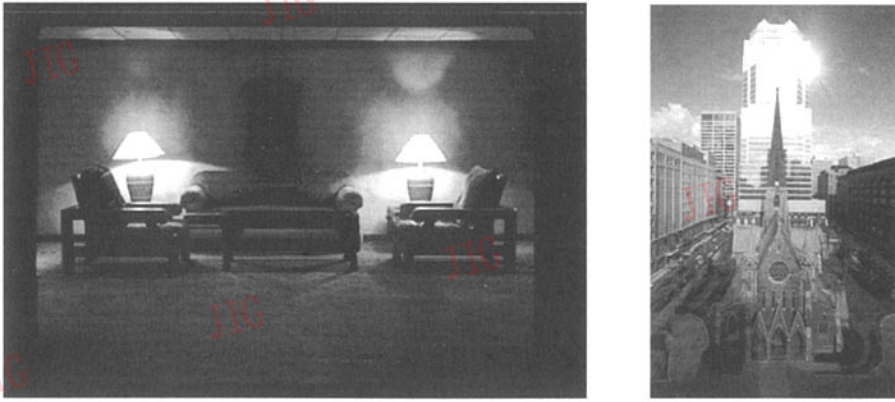


图 3 式(5)中 σ 取不同值时 8bit 图像处理结果

Fig. 3 An 8bit image and its processed results by eq. (5) at different σ 's



(a) 图 2(a)处理结果

(b) 图 3(a)处理结果

图 4 图 2、图 3 原始图像用式(7)处理的结果

Fig. 4 The processed results of Fig. 2(a) and Fig. 3(a) by eq. (7)

表 1 式(7)参数的取值

Tab.1 Values of the parameters in eq. (7)

a	b	m	n
1.0	0.25	1.0	1.0

3 实验结果与讨论

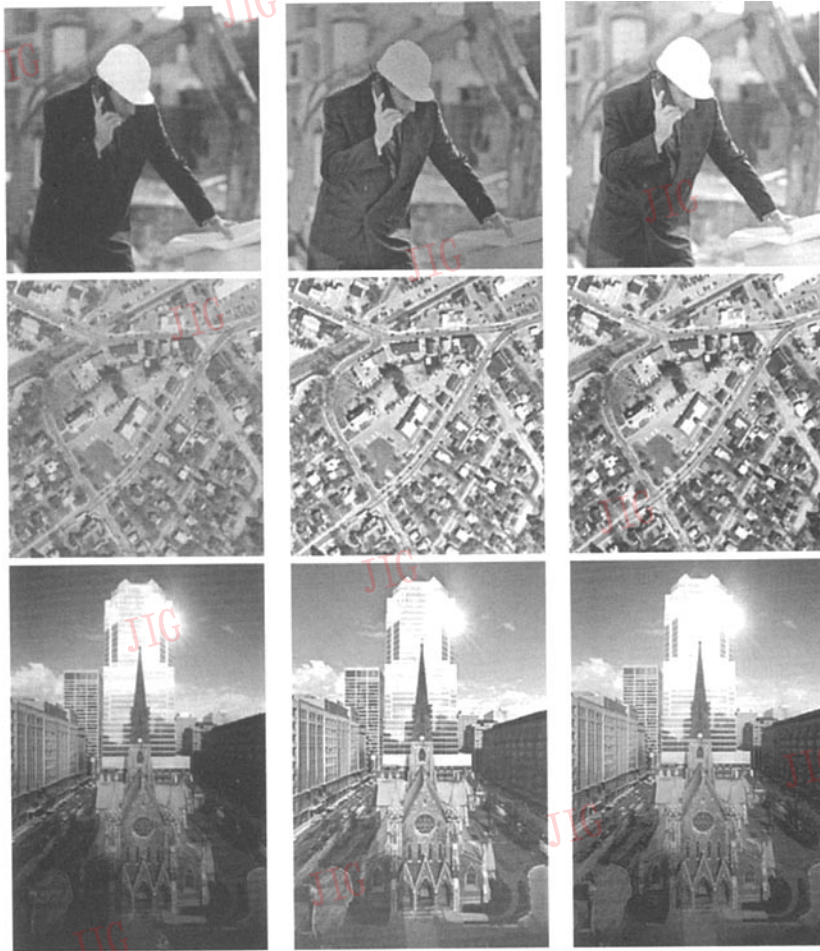
下面给出几幅原始图像及其分别用文献[21]的模型与本文模型进行处理的结果(如图 5 所示)。需要说明的是,文献[21]的模型对于多数常见图像来说,其处理效果比较理想,而本文的模型也并非适用于一切图像(有些图像处理结果色调发生偏移,显得不太自然),因而仍有改进的余地。由于 retinex 模型的处理效果与文献[21]模型的处理效果大体相当,且其出发点及公式表示均比较接近,因而下文关于文献[21]模型的讨论将适用于 retinex 模型。

由图 5 可见,对于第 1 行的原始图像而言,文献[21]模型的处理结果虽然很好地突出了图像暗区部分的细节,但它也改变了图像的总亮度对比关系。例如,图中图纸、工作帽部分的亮度反而低于左边衣兜部分的亮度,这显然与实际情况不符。另外,其右手衣袖底下的纽扣部分出现“白化”现象。考察该模型在不同尺度下的处理结果可知,这种“白化”现象是由小尺度处理引进来的。这说明,虽然多尺度模型的确能综合不同尺度各自的优点,但它仍无法完全消除不同尺度各自的缺点。而本文模型则能有效避免上述“灰度反转”和“白化”现象,并能

在突出图像暗区细节的同时,使处理结果与实际情况较为接近。对于图 5 中第 2 行的原始图像而言,两种模型均有效消除了外界照明的影响,但本文模型色调最为自然。至于图 5 中第 3 行的原始图像的处理结果,两种模型各有优缺点。文献[21]的模型总体亮度较高、对比度较大,但其在处理蓝天这一背景时,色调明显偏离实际情况,而本文的模型则很好地保持了背景的色调,且对于暗区的细节亦能有效地表现出来。

文献[3]指出,“光晕”效应的产生,一方面是由于高对比度边缘暗侧的像素平均值在亮侧邻域像素的影响下变得很大,使增益降低,从而在处理结果中显得较暗;另一方面,由于高对比度边缘亮侧的像素平均值在暗侧邻域像素的影响下变得很小,使增益提高,从而在处理结果中显得较亮。为此,该文在确定背景强度时,提出了一种由亮度对比关系决定加权系数的方法。本文的仿真实验表明,该方法一方面较大地增大了时间开销,另一方面还有平滑甚至消除图像细节的不利作用。考察 retinex 模型及文献[21]的模型可以发现,当空间常数取值较小时,必然也会出现“光晕”现象,这可从图 6 中得到证实。由图 6 可见,在灯盖的左右两侧及顶侧均出现了显著的“光晕”效应。

为了消除“光晕”现象,retinex 模型及文献[21]的模型的空间常数取值都非常大(最大空间常数达到 180),这虽可降低高对比度边缘邻域亮度对其两侧局部平均亮度的影响,但必然会显著增加两种模型的时间复杂度,使其难于应用到实时性要求



(a)原始图像 (b)文献[21]模型处理结果 (c)本文模型处理结果

图 5 原始图像及其分别应用不同模型的处理结果

Fig. 5 The original images and the processed results by applying different models



图 6 在单尺度下,应用文献[21]的模型对图 2 原始图像进行处理的的结果(空间常数为 5)

Fig. 6 The processed result of Fig. 2(a) by [21] model at a single scale with the space constant being 5

较高的图像处理场合。

本文的模型则能显著降低“光晕”效应的影响程度。对比这几种模型的表达式,这一点将不难理解。此外,本文模型对于空间常数没有较大的要求。在本文所给图例中,由于空间常数仅仅为 1,从而模板大小只有 7×7 ,运算速度远远快于其他模型。

4 结 论

本文在简要分析几种色调再现算法不足的基础上,提出了一种基于视锥细胞适应模型的色调再现算法。仿真结果表明,本文模型有以下特点:①能够有效突出图像亮区和暗区的细节,且动态范围压缩性能较好;②能够在很大程度上减弱色调再现领域

经常出现的“光晕”效应;③能够避免 retinex 等模型带来的“白化”现象;④处理结果的色调偏离真实景物的程度较低,其颜色恒定性能较好;⑤在计算背景光强时,由于所用模板非常小,速度远远快于一般的算法,因而有希望应用到实时性要求较高的工程领域。不过对于个别图像,本文模型会出现一定程度的色调偏移;另外,本文模型处理图像的对比度尚嫌不足,仍有提高的余地;本文模型参数是通过作图法和大量实验确定的,它们未必适用于一切图像,有必要在对更多图像进行实验的基础上对其进行改善。这些将是以后研究的方向。

参考文献 (References)

- 1 Ferwerda J A, Pattanaik S N, Shirley P, *et al.* A model of visual adaptation for realistic image synthesis [A]. In: Proceedings of the 23rd ACM Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996:249 ~ 258.
- 2 Shah S, Levine M D. Visual information processing in primate cone pathways—part I: A model [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(2):259 ~ 274.
- 3 Pattanaik S, Yee H. Adaptive gain control for high dynamic range image display [A]. In: Proceedings of the 18th ACM Spring Conference on Computer Graphics [C], Budmerice, Slovakia, 2002: 83 ~ 87.
- 4 Chang P, Yeh B. A retina-like image acquisition system with wide range light adaptation [A]. In: SPIE Visual Communications and Image Processing '91: Image Processing [C], Boston, MA, USA, 1991, 1606:456 ~ 469.
- 5 Tumblin J, Rushmeier H. Tone reproduction for realistic images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1993, 13(6):42 ~ 48.
- 6 Larson G W, 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.
- 7 Pattanaik S N, Tumblin J, Yee H, *et al.* Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display [A]. In: Proceedings of the 27th ACM Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New Orleans, Louisiana, 2000: 47 ~ 54.
- 8 Devlin K, Chalmers A, Wilkie A, *et al.* Tone reproduction and physically based spectral rendering [A]. In: Proceedings of Eurographics 2002: State of the Art Reports [C], Aire-la-Ville, Switzerland, 2002: 101 ~ 123.
- 9 Land E, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1):1 ~ 11.
- 10 Land E. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: Color vision and the natural image [J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1983, 80(16): 5163 ~ 5169.
- 11 Land E. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision [J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1986, 83:3078 ~ 3080.
- 12 Rahman Z, Jobson D J, Woodell C A. Multiscale retinex for color image enhancement [A]. In: Proceedings of the IEEE 1996 International Conference on Image Processing [C], New York, 1996, 3:1003 ~ 1006.
- 13 Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3):451 ~ 462.
- 14 Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965 ~ 976.
- 15 Grossberg S. Contour enhancement, short term memory, and constancies in reverberating neural networks [J]. Studies in Applied Mathematics, 1973, 52(3):217 ~ 257.
- 16 Grossberg S, Mingolla E, Williamson J. Synthetic aperture radar processing by a multiple scale neural system for boundary and surface representation [J]. Neural Networks, 1995, 8(7-8):1005 ~ 1028.
- 17 Grossberg S, Mingolla E. Neural dynamics of surface perception: Boundary webs, illuminants, and shape-from-shading [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1987, 37(1): 116 ~ 165.
- 18 Mingolla E, Ross W, Grossberg S. A neural network for enhancing boundaries and surfaces in synthetic aperture radar images [J]. Neural Networks, 1999, 12(3):499 ~ 511.
- 19 Grossberg S, Mingolla E. Visual brain and visual perception: How does the cortex do perceptual grouping [J]. Trends in Neuroscience, 1997, 20(3):106 ~ 111.
- 20 Grossberg S, Raizada R D S. Contrast-sensitive perceptual grouping and object-based attention in the laminar circuits of primary visual cortex [J]. Vision Research, 2000, 40(10-12):1413 ~ 1432.
- 21 Pu T, Zhang J, Ni G. Color image enhancement using a multiple-scale opponent neural network [J]. Optical Engineering, 2004, 43(10): 2369 ~ 2380.