

基于人眼视觉特性的彩色图像自适应增强算法

康 牧^{1,2} 王宝树¹

(¹西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071; ²洛阳师范学院信息技术学院, 河南 洛阳 471022)

摘要 针对有些图像增强算法对噪声比较敏感,提出了一种自适应图像增强算法。利用原算法的基本原理,结合人眼的视觉特性自适应地生成算法的参数,这样首先保留了原算法实现容易、运算速度快等特点,其次,对噪声具有一定的抑制作用,再次,可以增强和保留图像细节信息。通过实验比较,所提算法能够自适应地生成算法的参数,并在保持了原算法原有的容易实现的优点的基础上,提高了算法抑制噪声方面的性能,将该算法应用于彩色图像增强也取得了相当理想的结果。

关键词 图象处理;图像增强;抑制噪声;颜色空间

中图分类号 TP31 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092911.3018

An Adaptive Color Image Enhancement Algorithm Based on Human Visual Properties

Kang Mu^{1,2} Wang Baoshu¹

(¹ School of Computer, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
² Academy of Information Technology, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471022, China)

Abstract For the sensitivity to noise of some image enhancement methods, an adaptive image enhancement algorithm is proposed. Using the basic principle of the original method, the parameters of the algorithm is adaptively generated according to the human visual properties. Firstly, the proposed algorithm can keep the original advantages such as easy realization and quick calculation. Secondly, it plays a certain part in restraining noise. Finally, it can enhance and reserve the detail information. By comparing with other image enhancement algorithms, the proposed algorithm can get parameters of algorithm automatically. Besides the easy realization of original method, the new algorithm also can improve the performance in restraining noise. At the same time, it can be used to enhance color image.

Key words image processing; image enhancement; restrain noise; color space

1 引 言

图像增强技术就是把图像中对观测者有用的信息加以增强,使图像对比度更高,视觉效果更好。许多学者进行了大量的研究,提出了许多种实际有用的方法,常规的方法有直方图均衡、同态增强等; Jourlin 等^[1,2] 研究了一种对数图像处理(LIP)的数学结构;Deng 等^[3] 提出了基于 LIP 模型的图像增强算法的改进方法;许欣等^[4] 提出了一种消除光晕

现象的快速 Retinex 图像增强算法;付树军等^[5] 提出了一种基于双向耦合扩散的保持特征的边缘锐化和图像增强算法;王刚等^[6] 提出了脊小波变换域模糊自适应图像增强算法;李琦等^[7] 采用直方图拉伸和中值滤波相结合的方法来增强图像;朱毅等^[8] 利用二阶导数项的相干增强各向异性扩散算法对光学相干层析图像预处理来进行光学相干层析图像层状结构的增强也取得了非常好的效果;一些研究者利

收稿日期: 2008-11-30; 收到修改稿日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60702063)和河南省自然科学基金项目(2007520035)资助课题。

作者简介: 康 牧(1968—),男,博士研究生,副教授,主要从事智能信息处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: kmuwd@sina.com.

导师简介: 王宝树(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: bshwang@xidian.edu.cn.

用了人眼的视觉特性^[9~15]来增强图像,还有些研究者使用了模糊^[12,14]的有关概念和方法。但是这些方法有的对噪声非常敏感,有的容易丢失角点等细节信息,有的适用面比较窄,有的则复杂度太高、运算时间长,在实时图像处理系统中不实用。本文提出了一种图像增强的简单算法,这种方法具有抑制噪声的能力,可以增强和保留图像的细节信息,而且易于实时实现。该算法基于 LIP 模型,并且充分利用了人眼的基本视觉特性。

在彩色空间^[16]中按用途颜色模型可分为两类:一类面向硬件设备;另一类面向彩色处理。面向硬件设备的最常用的颜色模型是 RGB 模型(红:Red,绿:Green,蓝:Blue),面向彩色处理的最常用模型是 HSI 模型(色调:Hue,饱和度:Saturation,亮度:Intensity)。本文通过实验比较,扩充了黄凯奇等^[9~11]对 RGB 颜色模型的意见。将本文的算法直接应用于彩色图像的 R,G,B 分量进行彩色图像增强,实验证明,增强后的彩色图像,细节更加清晰,色彩更加鲜艳而又不会产生失真。

2 基于 LIP 模型的图像增强算法

一些基于 LIP 模型的图像增强算法^[9,13]通过对灰度函数进行归一补变换来简化算法,灰度函数归一补变换定义如下:

$$\bar{f} = 1 - (f/M), \quad (1)$$

其中灰度函数 f 的值域定义在 $[0, M)$ 区间,对于 8 bit 图像, $M = 256$ 。它们简化后的算法可以表示为

$$\ln[\bar{f}'(i, j)] = \alpha \ln[\bar{a}(i, j)] + \beta \{\ln\{\bar{f}(i, j) - \ln[\bar{a}(i, j)]\}\}, \quad (2)$$

其中 $\bar{f}(i, j)$ 和 $\bar{f}'(i, j)$ 分别是原始的和处理后的灰度函数, α 和 β 是实数,另外

$$\ln[\bar{a}(i, j)] = \frac{1}{n \times n} \left\{ \sum_{k=i-n/2}^{i+n/2} \sum_{l=j-n/2}^{j+n/2} \ln[\bar{f}(k, l)] \right\} \quad (3)$$

然后将 $\bar{f}'(i, j)$ 当作 \bar{f} 代入(1)式,并求(1)式的逆运算 $f = (1 - \bar{f})M$ 得到 $f(i, j)$, 即为增强后的图像。

可以看出 $\alpha \ln[\bar{a}(i, j)]$ 式可以增强图像非常暗或非常亮区域的细节。 $\bar{a}(i, j)$ 在区间 $(0, 1]$ 中,当 $0 < \alpha < 1$ 时, $\bar{a}(i, j)^\alpha$ 如图 1 所示,该非线性变换过程可以扩展图像暗区域的动态范围。当 $\alpha > 1$ 时,该非线性变换过程可以扩展图像亮区域的动态范围。

图像可通过 $\beta[\ln(\bar{f}(i, j) - \ln[\bar{a}(i, j)])]$ 得到锐化。当 $\beta > 1$ 时,中心像素和周围像素均值的差值被

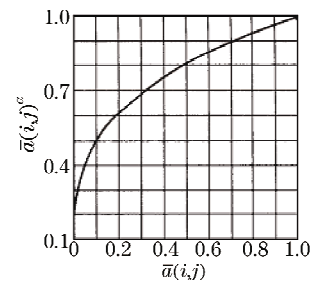


图 1 非线性变化曲线($\alpha=0.3$)

Fig. 1 Curve of nonlinear variance ($\alpha=0.3$)

非线性放大了。 β 值越大,图像的边缘增强越大。

在实际的图像处理问题中,原始图像常常只有一少部分是非常暗(亮)的。上述算法可以有效地增强非常暗(亮)区域的对比度,但是图像其它部分的对比度不能同时得到增强。这可以通过图 1 看出,对于 $0 < \alpha < 1$,当亮度值很小时[即 $\bar{a}(i, j)$ 很小时],变换曲线的斜率较大,因此暗区域的对比度可以增强,当亮度值很大时[即 $\bar{a}(i, j)$ 很大时],变换曲线的斜率较小,因此亮区域的对比度将不能被增强,甚至会被削弱。同理,对于 $\alpha > 1$,亮区域的对比度可以增强,而暗区域的对比度将不能被增强,甚至会被削弱。所以,设定固定的 α 值对许多图像是不适合的。

上述算法的另一个不足是,它会在增强图像细节的同时增强图像中的噪声。当 $\beta > 1$ 时,边缘和噪声都会被增强。

3 提出的新算法

文献[3]在计算(2)式时需要人为指定 α 和 β 的值。文献[13]将(2)式转换为下式来增强图像:

$$\ln[\bar{f}'(i, j)] = \ln\{T[\bar{a}(i, j)]\} + \beta_s \{\ln[\bar{f}(i, j) - \ln[\bar{a}(i, j)]]\}, \quad (4)$$

使用 Prewitt 正交算子作用于原图像得到梯度图像 $I_g(x, y)$ 和最大梯度值 $\max I_g$, 然后再使用式子 $\beta_s = \beta_0 |I_g(x, y)| / \max I_g$ ($\beta_0 = 3.0$) 计算 β_s, β_s 的作用相当于(2)式中的 β , 函数 T 的作用相当于(2)式中的 α 。

本文也是利用(1)式~(3)式和(1)式的逆运算 $f = (1 - \bar{f})M$ 来增强图像,并充分考虑了人类视觉系统的“韦伯法则”(Weber's Law)或灰度特性及“结构噪声掩模”等视觉特性,根据图像特征自适应地生成 α 和 β 的值。

具体实现方法如下:

根据“视觉系统在边缘或结构化区域具有比平

滑区域小的噪声敏感度”,可以使图像的局部对比度在细节部分增加得大一些,在平缓的部分小一些,即让(2)式中的参数 β 随着区域的空间变化率而改变。图像的梯度反映了图像的空间变化率,使用正交的 Prewitt 算子作用于原图像得到梯度图像^[13],

水平方向偏导数: $P_0[i, j] = I[i-1, j] - I[i+1, j]$,
 垂直方向偏导数: $P_{90}[i, j] = I[i, j-1] - I[i, j+1]$,
 135°方向偏导数: $P_{135}[i, j] = 2 \times (I[i-1, j-1] - I[i+1, j+1])$,
 45°方向偏导数: $P_{45}[i, j] = 2 \times (I[i+1, j-1] - I[i-1, j+1])$,

$$I_g[i, j] = \sqrt{P_0^2[i, j] + P_{90}^2[i, j] + P_{135}^2[i, j] + P_{45}^2[i, j]}. \quad (5)$$

也可以简化为

$$I_g[i, j] = |P_0[i, j]| + |P_{90}[i, j]| + |P_{135}[i, j]| + |P_{45}[i, j]|. \quad (6)$$

这里定义的梯度算子,比 Prewitt 正交算子多考虑两个方向,它的噪声平滑能力要比 Prewitt 正交算子强一些,后面的实验说明了这一点。

考虑到人类视觉系统的“韦伯法则”(Weber's Law)或灰度特性,利用文献[17]中计算自适应阈值的方法,用(7)式来计算自适应阈值:

$$t_{thr}(x) = \begin{cases} -0.001738x^2 + 0.000072x + 15 & 0 \leq x \leq 48 \\ -0.000491x^2 + 0.125635x - 2.030474 & 48 < x \leq 206 \\ -0.009579x^2 + 4.885464x - 595.896710 & 206 < x \leq 255 \end{cases}. \quad (7)$$

为了实现在增强暗区域的对比度的同时,也增强亮区域的对比度,要求(2)式中的 α 在暗区域里大于零小于1,而在亮区域里,大于1。故

$$\alpha = 0.79 + a_{ave}/142.0, \quad (8)$$

其中 a_{ave} 是待检测点的 3×3 邻域平均值。

这样在暗区域, a_{ave} 值较小,故 α 值小于1,有利于增强暗区域的对比度;在亮区域, a_{ave} 值较大,故 α 值大于1,有利于增强亮区域的对比度。这比设定固定的 α 值要好得多。

为了实现在增强图像细节的同时,抑制噪声,要求(2)式中的 β 在人眼灰度敏感区域和结构化区域大一些,有利于增强图像细节(因为人眼容易分辨它们的不同),在人眼灰度不敏感区域和平坦区域小一些,有利于抑制噪声(因为人眼不容易分辨它们的不同)。故

$$\beta = I_g[i, j] \times 0.097/t_{thr}, \quad (9)$$

其中 t_{thr} 是把 a_{ave} 当作 x 代入(7)式计算出来的, $I_g[i, j]$ 是由(5)式或(6)式计算出的梯度值。

这样在相同的灰度区域中, t_{thr} 值相同,当待检测点的梯度值比较大时, β 值较大,有利于增强边缘信息;当梯度值较小时, β 值也较小,有利于抑制噪声。且对于相同的梯度值,在不同的灰度区域由于 a_{ave} 值不同,所计算得到 t_{thr} 值也不相同,从而所得

由于它只考虑了水平和垂直方向,没有考虑对角线方向,效果不是很好。为此,定义一个梯度算子作用于原图像得到梯度图像 $I_g[i, j]$ 。

定义的梯度算子如下:

的 β 值也是不同的,在人眼灰度敏感区域 t_{thr} 值较小,则对于相同的梯度值 β 值较大,有利于增强边缘信息,在人眼灰度不敏感区域 t_{thr} 值较大,则对于相同的梯度值 β 值较小,有利于抑制噪声,这样既考虑到了人眼视觉的结构化特性,也考虑了人眼视觉的灰度特性,这比设定固定的 β 值要好得多。故本文计算得到的 β 值要比文献[13]计算得到的 β 值更合理些。

新算法根据原算法存在的问题,结合人眼的视觉特性,能够根据待检测点所处的灰度区域及梯度值的不同自适应地生成 α 和 β 值,这样新算法可以有效地增强大多数图像的对比度,且可以抑制噪声,它不仅增强灰度图像,用于增强彩色图像,效果将会更明显。

4 实验结果和比较分析

用大量的图像对本文所提出的算法进行了实验,结果表明新算法有较好的效果。第一部分先用灰度图像来检测各算法增强的效果及对噪声的敏感程度。第二部分用彩色图像来验证本文算法的适用性,只给出了文中算法的结果,同时给出 RGB 模型和 HSI 模型在彩色图像增强方面的差异。

实验 1:为了检测各算法对噪声的敏感程度,对含有(均值 $\mu = 0$,方差 $\sigma = 20$)高斯白噪声的 Lena 图像利用直方图均衡法、参考文献[3]的方法($\alpha =$

$0.9, \beta = 0.97^{[13]}$)、参考文献[13]的方法($a = 0.3, b = 0.7, \beta_0 = 1.025$)和本文方法进行增强,实验结果如图 2 所示。

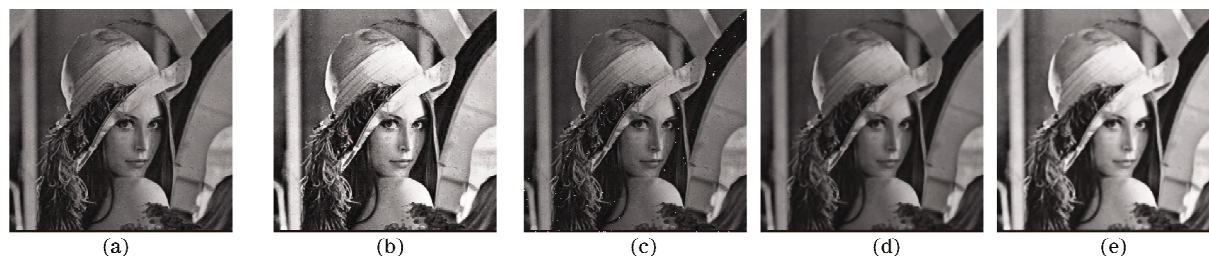


图 2 实验结果 1。(a)Lena 图像(含噪声);(b)直方图均衡法;(c)文献[13]方法;(d)文献[13]方法;(e)本文方法

Fig. 2 Result of experiment 1. (a) Lena image (with noise); (b)method of histogram equalization; (c)method of Ref. [3];(d)method of Ref. [13]; (e) the proposed method

因为文中图片尺寸不能太大,故直接从图片中看它们的视觉效果是可以的,但是要想观看噪声点则不是很容易,由于边缘检测算法^[18]在不进行去噪处理时,对噪声非常敏感,且可以得到单像素边缘,

从得到的边缘图像中更容易观察到各种增强算法对噪声抑制能力的不同,故用边缘检测算法(不进行去噪处理)对实验 1 所得到的每幅图片进行边缘检测,实验结果如图 3 所示。

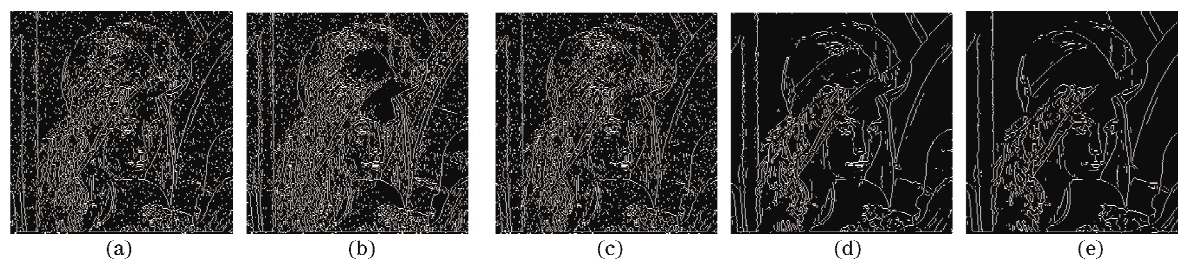


图 3 实验结果 2。(a)Lena 图像(含噪声);(b)直方图均衡法;(c)文献[3]方法;(d)文献[13]方法;(e)本文方法

Fig. 3 Result of experiment 2. (a) Lena image (with noise); (b)method of histogram equalization; (c)method of Ref. [3];(d)method of Ref. [13]; (e) the proposed method

从图 2 可见,直方图均衡法所得结果,图像对比度最鲜明、视觉效果最好,其次是本文方法,文献[13]方法又比文献[3]方法稍好一些;从图 3 可见,直方图均衡法和文献[3]方法的边缘图像中噪声点几乎淹没了图像,文献[13]方法的边缘图像中噪声点不是很多,比直方图均衡法和文献[3]方法中的噪声点要少得多,但是图像左边白色柱子的边缘要比本文方法所得边缘要粗糙得多,且在图像中的帽子中部和图像右下角部分噪声点也比较多。这说明用本文定义的梯度算子计算图像的梯度要比文献[13]使用的 Prewitt 正交算子好一些,且自适应地形成算法的 α, β 等参数在抑制噪声和增强边缘方面起了很大的作用,虽然本文算法在计算梯度时算法复杂度稍高,但抑制噪声能力提高了很多,更重要的是增强后的图像视觉效果要好得多,从总体上说本文方法是比较理想的。

在 HSI 模型中,亮度 I 分量与图像的彩色信息无关^[16]。但 RGB 模型中各分量相关性大,HSI 模型中各分量相关性小^[9~11]。故实验 3 对某市区的图像用 HSI 模型只对 I 分量进行直方图均衡,色调 H 分量与色度和 S 分量不变,进行图像增强,然后对同样的图像用本文算法进行增强,从而来验证 I 分量对彩色信息的影响,及使用 HSI 模型对图像进行增强时存在的问题,同时说明本文方法的有效性,及 RGB 模型用在图像增强方面的合理性,最后给出本文算法对其它几幅图片增强的结果。

从实验 3 的结果可以看出原图像左上边的浅蓝色区域,在 HSI 模型中 I 分量进行直方图均衡以后却变成了深红色,且图中大多数地方的颜色都产生了失真。对于 HSI 模型,只改变 I 分量是不应该产生失真的,这里产生失真的原因可以从 HSI 模型到 RGB 模型的转换公式中得到答案^[16],只给出 H 在

[0, 120°] 区间内的转换公式:

$$\begin{cases} B = I(1 - S) \\ R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\ G = 3I - (B + R) \end{cases} \quad (10)$$

由(10)式可知当 S 分量和 H 分量不变时, R, G, B 三种颜色随着 I 分量的变化成比例地变化, 颜色是会产生失真的, 但是在对 I 分量进行增强后, 再按(10)式计算 R, G, B 时, 有可能超出它们的表示范围(0 ~

255), 这时不论按溢出处理, 还是按最大值处理, R, G, B 的比例都要改变, 从而颜色将产生失真。表 1 给出了一个具体例子: 第一行是原始图像数据; 第二行是增强后按溢出处理, $R=304 > 255$, 取溢出值 $304 - 256 = 48, B=135, G=227 \times 3 - (135 + 48) = 498$, 取溢出值 $498 - 256 = 242$; 第三行是增强后按最大值处理, $R=304 > 255$, 取最大值 255, $B=135, G=227 \times 3 - (255 + 135) = 291 > 255$, 取最大值 255。

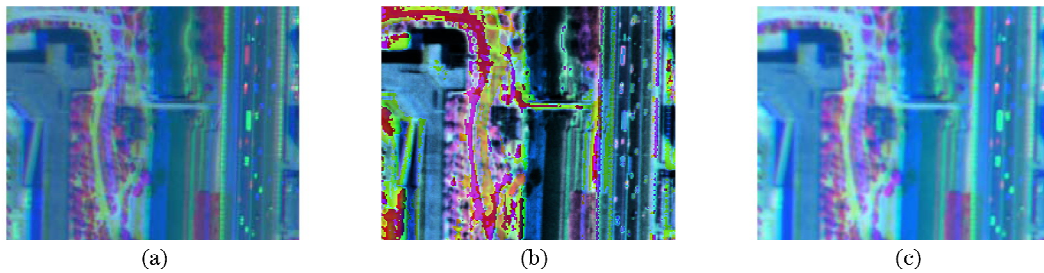


图 4 实验结果 3。(a)原图像;(b) I 分量均衡(H, S 不变);(c)文中算法

Fig. 4 Result of experiment 3. (a) the original image; (b) I weight equalization (with original of H and S); (c) the proposed method

表 1 改变 I 分量引起颜色失真的例子

Table 1 The color distortion example of change weight I

| Line | H | S | I | R | G | B |
|------|----------|----------|------------|----------|----------|-----|
| 1 | 0.684744 | 0.407229 | 138.333333 | 185 | 148 | 82 |
| 2 | 0.684744 | 0.407229 | 227.000000 | 48(304) | 242 | 135 |
| 3 | 0.684744 | 0.407229 | 227.000000 | 255(304) | 255(291) | 135 |

这说明当 I 分量增强时颜色可能会产生失真, 在实际应用中对 I 分量进行增强时, 很难知道它是否会引起颜色失真, 对于 H 分量和 S 分量的增强也存在类似的问题。由(10)式可知 I 分量是会影响彩色信息的, 它或者是同比例影响彩色信息(注: 不产生失真), 或者改变各彩色信息的比例(产生失真), 由实验 3、(10)式和表 1 可知在 HSI 模型中, 对各分量分别进行增强相当难以控制, 它们之间具有相当

强的相关性, 而在 RGB 模型中对 R, G, B 分量分别增强, 它们中间的任何一个增强过量都不会影响另外两个分量, 它们之间的相关性不是很大。本文算法所得到的结果, 色彩鲜艳, 对比度高而又不产生失真, 这一方面说明本文算法的有效性, 另一方面也说明在图像增强处理中使用 RGB 模型也具有其合理性, HSI 模型也有一定的局限性。为说明文中算法的广泛适用性, 图 5 附上其它的几个例子。

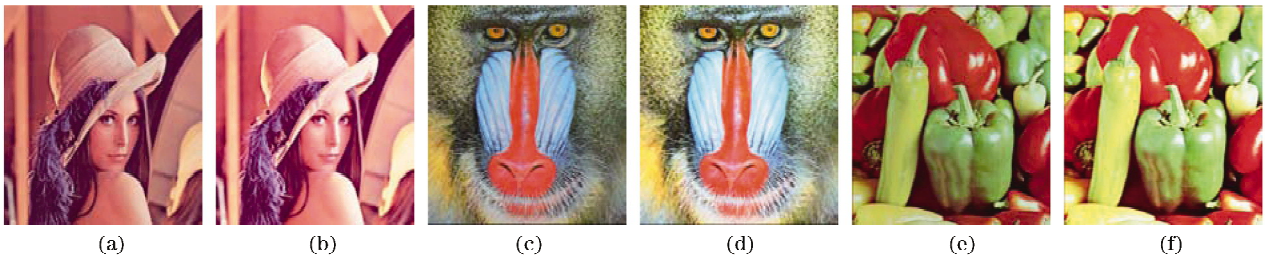


图 5 几个例子。(a)原图 1;(b)增强 1;(c)原图 2;(d)增强 2;(e)原图 3;(f)增强 3

Fig. 5 Some examples. (a) the original of image 1; (b) the enhancement 1; (c) the original of image 2; (d) the enhancement 2; (e) the original of image 3; (f) the enhancement 3

综合考虑比较三个实验的结果可以看出本文算法不但可以有效地增强图像的对比度,而且可以有效地抑制噪声,所得结果是比较理想的。本文方法能够取得比较理想的效果,主要是因为充分考虑了人眼视觉的结构化特性和灰度特性,能够自适应地生成 α, β 值,且在计算图像梯度时使用更优良的梯度算子等措施的必然结果。本文算法用于各彩色图像增强,效果也比较理想,这说明本文算法具有一定的适用性。从实验3和另外几个例子可以看出本文算法对原对比度比较低的图像增强效果比较明显(如实验3的结果);从图5(c)、(d)可以看出,图像增强后不但视觉效果好看多了,且‘狒狒’嘴边的胡子更加清晰明亮了,这说明本文算法能够增强图像的视觉效果又不会引起失真,能够有效地抑制噪声且可以增强和保留图像的细节信息。

5 结 论

充分利用了人眼视觉的结构化特性和灰度特性,在分析了基于LIP模型的图像增强算法的改进方法的基础上,提出了一种新的自适应图像增强算法。新算法通过使用更优良的梯度算子计算得到梯度图像,再根据人眼视觉特性和图像的局部特征自适应地生成相应的参数。理论和实验结果分析表明,本文算法是一种具有一定噪声抑制能力、能够增强和保留图像细节信息且又不会引起颜色失真的图像增强算法,也较容易满足实时图像处理系统的要求。通过理论分析和对彩色图像的实验,说明HSI模型各分量之间也有相当强的相关性,亮度与图像的彩色信息也有一定的关系,说明了RGB模型用在图像增强处理方面也是可以的。

参 考 文 献

- 1 M. Jourlin, J. C. Pinoli. A model for logarithmic image processing[J]. *J. Microsc.*, 1988, **149**(1): 21~35
- 2 M. Jourlin, J. C. Pinoli. Contrast definition and contour detection for logarithmic images [J]. *J. Microsc.*, 1989, **156**(10): 33~40
- 3 G. Deng, L. W. Cahill, G. R. Tobin. The study of logarithmic image processing model and its application to image enhancement [J]. *IEEE T. Image Process.*, 1995, **4**: 506~512
- 4 Xu Xin, Chen Qiang, Wang Pingan *et al.*. A fast halo-free image enhancement method based on retinex [J]. *J. Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2008, **20**(10): 1325~1331
- 5 许欣,陈强,王平安等.消除光晕现象的快速Retinex图像增强[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, **20**(10): 1325~1331
- 6 Fu ShuJun, Ruan QiuQi, Mu ChengPo *et al.*. Feature preserving coupled bidirectional flow for edge sharpening and image enhancement[J]. *Chinese J. Computer Terms.*, 2008, **31**(3): 529~536
- 7 付树军,阮秋琦,穆成坡等.基于双向耦合扩散的保持特征的边缘锐化和图像增强[J]. *计算机学报*, 2008, **31**(3): 529~536
- 8 Wang Gang, Xiao Liang, He Anzhi *et al.*. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1183~1190
- 9 王刚,肖亮,贺安之等.脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1183~1190
- 10 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 11 李琦,姚睿,单纪鑫等.基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 12 Zhu Yi, He Yonghong, Li Peng *et al.*. Enhancement and quantitative measurement of layer structures in optical coherence tomographic images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 515~520
- 13 朱毅,何永红,李鹏等.光学相干层析图像层状结构的增强与定量测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 515~520
- 14 Huang Kaiqi, Wang Qiao, Wu Zhenyang *et al.*. Multi-scale color image enhancement algorithm based on human visual system[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8A**(11): 1242~1247
- 15 黄凯奇,王桥,吴镇扬等.基于人眼视觉特性的多尺度彩色图像增强算法[J]. *中国图像图形学报*, 2003, **8A**(11): 1242~1247
- 16 Huang Kaiqi, Wang Qiao, Wu Zhenyang *et al.*. Multi-scale color image enhancement based on human visual properties [J]. *J. Circuits and Systems*, 2003, **8**(6): 113~117
- 17 黄凯奇,王桥,吴镇扬等.基于视觉特性的多尺度彩色图像增强算法[J]. *电路与系统学报*, 2003, **8**(6): 113~117
- 18 Huang Kaiqi, Wang Qiao, Wu Zhenyang *et al.*. Multi-scale color image enhancement based on color space and human visual system (IIVS) [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(4): 673~676
- 19 黄凯奇,王桥,吴镇扬等.基于视觉特性和彩色空间的多尺度彩色图像增强算法[J]. *电子学报*, 2004, **32**(4): 673~676
- 20 Leng Hanbing, Wang Xian, Liu Shangqian *et al.*. A neighborhood adaptive fuzzy enhancement algorithm based on human visual properties [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(1): 62~65
- 21 冷寒冰,王先,刘上乾等.基于人眼视觉特性的邻域自适应模糊增强算法[J]. *光电工程*, 2004, **31**(1): 62~65
- 22 Yuan Xiaosong, Wang Xiutan, Wang Xiqin *et al.*. An adaptive image enhancement algorithm based on human visual properties [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(4): 63~65
- 23 袁晓松,王秀坛,王希勤等.基于人眼视觉特性的自适应的图像增强算法的研究[J]. *电子学报*, 1999, **27**(4): 63~65
- 24 Liu Jingen, Liu Xingjian, Zhou Can *et al.*. An adaptive image enhancement algorithm based on human visual properties and fuzzy sets [J]. *J. WUT (information & management engineering)*, 2006, **28**(12): 1~4
- 25 刘金根,刘兴建,周灿等.基于人眼视觉特性和模糊集的自适应图像增强算法[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, **28**(12): 1~4
- 26 Wu Yingqian, Fang Tao, Li Congliang *et al.*. An approach for image enhancement based on wavelet analysis and properties of human visual system [J]. *J. Data Acquisition & Processing.*, 2003, **18**(1): 17~21
- 27 吴颖谦,方涛,李聪亮等.一种基于小波分析和人眼视觉特性的图像增强方法[J]. *数据采集与处理*, 2003, **18**(1): 17~21
- 28 He Dongjian, Geng Nan, Zhang Yikuan. *Digital Image Processing* [M]. Xi'an: Xidian Press. 2003, 29~33
- 29 何东健,耿楠,张义宽等.数字图像处理[M].西安:西安电子

- 科技大学出版社, 2003, 29~33
- 17 Kang Mu, Xu Qinggong, Wang Baoshu *et al.*. A Roberts' adaptive edge detection method[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, **42**(10): 1240~1244
- 康 牧, 许庆功, 王宝树. 一种 Roberts 自适应边缘检测算法[J]. *西安交通大学学报*, 2008, **42**(10): 1240~1244
- 18 J. Canny. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE T. Pattern Anal.*, 1986, **8**(6): 679~698