

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0310-06

论文索引信息: 汪荣贵, 张新彤, 张璇, 方帅. 基于 Zernike 矩的新型 Retinex 图像增强方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 310-315

基于 Zernike 矩的新型 Retinex 图像增强方法研究

汪荣贵, 张新彤, 张璇, 方帅

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要: 针对传统的 Retinex 算法对雾天和彩色图像增强时, 会出现色彩恢复不协调, 光照分布不均匀这类缺点, 提出了一种新的基于 Zernike 矩模型的 Retinex 图像增强方法。通过在 HSV 空间中求解图像 V 分量和 S 分量的 Zernike 矩来提取图像的背景灰度和阶跃高度, 然后调节邻接像素内灰度变化差异和区域饱和度的相关性, 进而增强图像的亮度, 恢复图像的色彩。实验结果表明, 该方法有效地解决了图像色彩恢复和光照恢复不足这一问题, 而且对不同特点的图像都有良好的适应能力。

关键词: 图像增强; Retinex 算法; Zernike 矩; HSV 色彩空间

A novel Retinex algorithm for image enhancement based on Zernike moment

Wang Ronggui, Zhang Xintong, Zhang Xuan, Fang Shuai

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009 China)

Abstract: In view of such problems as the limited coloration effectiveness and the illumination distribute inharmonious for the traditional enhancement algorithm, a novel Retinex algorithm of image enhancement based on Zernike moment is proposed in this paper. By the Zernike moment of the V and S components of the image, the background gray level and step height in HSV space will be calculated. These results can be used to adjust the difference of gray level in intersection pixel and improve the correlation of regional saturation, and further to enhance the illumination and restore the image coloration. Experimental results show that the algorithm can both restore the image illumination, coloration effectively and adapt to various images of different characteristics.

Keywords: image enhancement; Retinex algorithm; Zernike moment; HSV color space

0 引言

图像增强是指有目的地强调图像的整体或局部特性, 以改善图像的视觉效果或满足特殊分析的需要^[1]。常见的图像增强方法有对比度拉伸、直方图均衡化、频域滤波等, 这些方法通常应用在灰度图像, 在色彩处理上都存在一定的局限性。

Land 在 20 世纪 70 年代提出一种更适用于彩色图像的增强方法, 即 Retinex 方法^[2]。其算法思想基于色彩恒常性理论, 即人对物体色彩的感知取决于物体表面的反射光特性, 与入射光无关。Retinex 算法把待增强图像看成是由反射光分量和入射光分量两部分组成, 通过像素之间的亮度比较得到入射光分量, 从而进一步得到反射光分量, 还原物体的本来面貌, 实现对图像的增强。

收稿日期: 2009-08-10; 修回日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61075032); 国家自然科学基金项目(60705015); 安徽省自然科学基金项目(090412059)。

第一作者简介: 汪荣贵(1966—), 男, 教授, 硕士生导师。2004 年获合肥工业大学计算机应用技术工学博士学位, 主要研究方向为智能视频处理与分析与多媒体技术。E-mail: wangrgui@126.com。

通讯作者: 张新彤, E-mail: zxtking@hotmail.com。

目前,Retinex 算法已经发展出多种形式,常见的有 McCann's 99 Retinex^[3],多尺度 Retinex(MSR)和带色彩恢复的 MSR(MSRCR)^[4],可变框架模型 Retinex^[5]等。这些算法都存在一定的局限性,McCann's 99 Retinex 采用迭代的思想,因而复杂度较高;可变框架模型 Retinex 算法需要求解复杂的偏微分方程,算法的复杂度较高;MSR 和 MSRCR 因其计算量较小而得到广泛应用,然而这两种算法选择像素比较的模板通常较大,对有多个发光源的图像处理效果不好,且易产生光晕伪影。

近年来针对以上 Retinex 算法的局限性,很多学者提出不同的改进方法,主要是在 MSR 的基础上对照度估计滤波器进行改进,消除光晕伪影并提高算法速度。2001 年,日本学者 Ogata 等人提出了一种 ϵ 滤波器^[6],为模板内的像素比较设定阈值,使低通滤波的范围较窄,提取出的入射光分量尽可能平滑,提高照度估计的精确度;2003 年,Agarwal 提出一种基于视频序列的照度估计方法^[7],通过计算视频中不同序列图像的线形相关性进行照度估计,该算法的优点在于运算简单,实时性较好,可应用在视频处理中;2006 年以色列惠普实验室的 Shaked 等人提出一种基于子采样的非线性滤波^[8],对图像的低分辨率部分下采样,对采样后的子图像进行非线性滤波提取入射光分量,然后对图像高分辨部分上采样,得到处理结果,加快算法的运算速度;2007 年,韩国学者 Choi 等人提出一种基于恰辨差异(JND)的非线性滤波器^[9],将人眼所能察觉的恰辨差异作为亮度比较的阈值,计算模板中心像素点与周围像素点亮度差异,比较其与恰辨差异的大小,改变照度估计模板的权值,以消除光晕伪影。同年,北京师范大学孙波等人提出一种带亮度修正的 Retinex 算法^[10],利用主成分分析进行照度估计,并通过 Canny 算子检测边缘信息,以消除光源伪影。2008 年,北京航空航天大学王文等人提出了一种 MSR 的加速算法^[11],通过对高斯模板进行算术修正,提高高斯模板的卷积速度。

现有的图像增强方法在增强图像细节,提高图像对比度时,往往使图像的色彩丢失的比较严重,而且对增强后的光照分布不能做出有效的调整,从而降低了处理结果的画质。本文在 Retinex 理论的框架内,通过 Zernike 正交多项式求解图像 HSV 空间中 S 分量和 V 分量的矩,计算出各分量的背景灰度和阶跃高度,然后通过调整邻近像素的可辨灰度差

异,进而提取图像的照度信息,修正图像的饱和度,最后通过空间转换实现对图像的增强。

1 Retinex 算法

Retinex 理论是 Jobson 等人根据根据色彩恒常性理论提出的一种图像增强方法,该方法首先假设一副图像是由入射光分量和反射光分量组成,如下式所示

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

式中, $I(x, y)$ 表示待增强图像, $R(x, y)$ 表示反射分量, $S(x, y)$ 表示入射分量。对式(1)取常用对数,将乘法变为加法,如式(2)所示

$$I'(x, y) = \log R(x, y) + \log S(x, y) \quad (2)$$

式中 $I'(x, y)$ 为 $I(x, y)$ 的对数。

然后,采用高斯函数对原图做平滑滤波,得到入射分量 $I_{\text{low}}(x, y)$,如下式所示

$$I_{\text{low}}(x, y) = I(x, y) * F(x, y) \quad (3)$$

式中, $F(x, y)$ 为高斯函数,表达式为

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right)$$

将 $I'(x, y)$ 与 $I_{\text{low}}(x, y)$ 再相减,得到对数域中的反射分量

$$R'(x, y) = I'(x, y) - \log I_{\text{low}}(x, y) \quad (4)$$

最后,对 $R'(x, y)$ 取反对数,得到增强后的图像

$$R(x, y) = \exp(R'(x, y)) \quad (5)$$

这里将高斯函数中的标准差 σ 称之为尺度参数。 σ 的大小直接影响对入射分量的估计。当 σ 取值较大时,高斯模板较大,高斯函数表现为相对平缓,卷积后,产生的入射分量估计也较平滑,表现为颜色保真能力好,但是细节增强效果较差;反之, σ 取值较小时,高斯模板较小,高斯函数表现为相对陡峭,卷积后的入射分量估计也相对崎岖,结果突出了图像的细节,颜色保真效果较差。因此,基于单一 σ 参数的单尺度 Retinex 算法无法同时保证细节增强与颜色保真。

多尺度 Retinex 算法(MSR)取不同尺度 σ 进行线性加权平均,实现细节增强与颜色保真之间的平衡,公式如下

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^k W_i \{ \log I(x, y) - \log [I(x, y) * F_i(x, y)] \} \quad (6)$$

k 为尺度参数 σ 的总个数, W_i 为权值,满足

$\sum_{i=1}^k W_i = 1$ 。一般情况下, MSR 取高、中、低 3 个尺度, 即 $k=3$ 。 $F_i(x, y)$ 表示参数为 σ_i 的高斯函数。

对于图像的理想阶跃边缘模型建立单位圆, 圆中的直线 L 的部分为图像的理想边缘, 两侧的灰度值分别为 h 和 $h+k$, 其中 k 为阶跃高度, h 为背景灰度, l 为圆心到边缘的垂直距离, ϕ 为 l 与 x 轴所成的角度。

Zernike 矩是 Teague 等人以复数 Zernike 多项式为基, 具有正交旋转不变特性的复数矩^[12-14], 不同阶次的 Zernike 矩计算如下

$$\begin{aligned} A'_{0,0} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h dx dy + 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} (h+k) dx dy = \\ & h\pi + \frac{k\pi}{2} - k \arcsin(l) - kl \sqrt{1-l^2} \\ A_{1,1} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h(x-iy) dx dy + \\ & 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} (h+k)(x-iy) dx dy = \frac{2k\sqrt{(1-l^2)^3}}{3} \\ A_{2,0} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h(2x^2+2y^2-1) dx dy + \\ & 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} (h+k)(2x^2+2y^2-1) dx dy = \frac{2kl\sqrt{(1-l^2)^3}}{3} \end{aligned} \quad (7)$$

为求解的方便我们可以使用 Zernike 矩的旋转不变性, 图像旋转 ϕ 角度之后的 Zernike 矩 $A'_{n,m}$ 和旋转前的 Zernike 矩 $A_{n,m}$ 的关系为

$$A'_{n,m} = A_{n,m} e^{-im\phi} \quad (8)$$

通过理想边缘模型联立方程组解以上的参数可以得到

$$l = \frac{A_{2,0}}{A'_{1,1}} \quad (9)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}[A_{1,1}]}{\text{Re}[A_{1,1}]}\right) \quad (10)$$

$$k = \frac{3A'_{1,1}}{2(1-l^2)^{3/2}} \quad (11)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} [2A'_{0,0} - k(\pi - 2\arcsin l - 2l\sqrt{1-l^2})] \quad (12)$$

考虑到图像的不同背景对光照的反射程度不同和人类视觉系统对灰度变化的敏感性, 根据恰变差异的方法, 通过对求解的 Zernike 矩背景灰度和阶跃高度进行视差调整, 进而对图像的亮度变化进行有效提取, 调整后的表达式为

$$H(i, j) = \varepsilon h(i, j) + \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 \left| \frac{h(i, j) - h(i-p, j-q)}{k(i-p, j-q)} \right| \quad (13)$$

式中 $H(i, j)$ 为调整后输入灰度, $\varepsilon = 0.93$ 为背景灰度调节因子。

2 Zernike 矩图像增强算法

2.1 图像 V 分量增强

在 HSV 空间中 V 分量反映了图像的亮度信息, 它决定整个图像的明暗程度, 对其进行动态范围的调整, 可以改善图像的整体亮度。尤其对高动态范围图像和低照度图像如何有效提取照度分量成为了图像增强的关键, 通过调整邻接像素间的背景灰度和阶跃高度之间的关系, 对图像的照度分量进行了创新性的提取, 以克服传统方法亮度恢复不足和出现光晕伪影等问题。

首先, 使用 $\lambda(x, y)$ 函数作为灰度差异的调节因子, 类比图像的背景灰度, 以反映灰度变化程度

$$\lambda(x, y) = \frac{\bar{\omega}}{\omega + h_v(x, y)} \quad (14)$$

式中 $\bar{\omega}$ 为整个图像的灰度均值, h_v 为图像 V 分量的背景灰度。为了表示图像的每个像素的阶跃高度与邻接像素的相关性, 本文算法分别选取所在像素的背景灰度与八邻接像素的阶跃高度来获取不同方向上的灰度差异, 相当于对中心像素使用一个邻接像素内的滤波窗, 其表达式为

$$\Phi(x, y; p, q) = \frac{|h_v(x, y) + k_v(x-p, y-q)|}{H_v(x, y)} \quad (15)$$

式中 H_v 为图像 V 分量调整后的背景灰度。然后, 通过灰度调节因子来修正不同方向上灰度变化的差异, 修正后的灰度差异可表示成为

$$W(x, y; p, q) = \lambda(x, y) \cdot \Phi(x, y; p, q) \quad (16)$$

本文定义了一个 $\delta(x, y; p, q)$ 函数作为亮度权重函数, 它用于对亮度的变化情况进行筛选, 对于本身灰度差异较大的部分给以保持, 降低它在照度估计中的权重; 对于灰度差异较小的部分则要对其进行拉伸, 根据人类视觉模型, 这种对灰度差异调整通常使用非线性拉伸; 而在图像中那些灰度差异非常小的部分, 往往是造成人对低照度景物辨别不清最主要的原因, 所以对这些极低灰度差异的处理是进行照度提取最重要的一部分, 它所占的权重也最大。其中 $\delta(x, y; p, q)$ 的表达式为

$$\delta(x, y; p, q) = \begin{cases} 1 & W(x, y; p, q) > 1 \\ e^{-\frac{W(x, y; p, q) - T}{1-T}} & T \leq W(x, y; p, q) \leq 1 \\ 0 & W(x, y; p, q) < T \end{cases} \quad (17)$$

式中 $T=0.75$, 然后综合不同方向上的灰度差异和差异变化的权重系数, 使用邻接像素内的滤波窗对所在的像素点进行照度估计, 可表示为

$$L_v(x, y) = \frac{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 r(p, q) \delta(x, y; p, q) W(x, y; p, q)}{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 r(p, q) \delta(x, y; p, q)} \quad (18)$$

$$r(p, q) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

最后, 根据 Retinex 理论通过对照度估计图像进行对数域做差求取图像的反射分量, 由此可以得到 HSV 空间中 V 分量的增强结果

$$F_v = \log_f(x, y) - \eta \log L_v(x, y) \quad (20)$$

式中 $\eta=0.83$, F_v 为 V 分量的增强图像。

2.2 图像 S 分量增强

在 HSV 空间中 S 分量反映了图像的颜色饱和度, 表示图像的单位面积内色彩的填充程度。不同类型的图像所表现出的饱和度也是不同的, 对于低照度图像由于物体表面的反射光较少, 出现整体较暗的情况, 图像单位区域内灰度级较低的像素较多, 因而使低亮度影响了人对颜色的感知。而雾天图像则是因为光经过大气环境色散的原因, 削弱了物体表面反射光, 出现泛白发昏的现象, 反映在图像中则是单位区域内灰度级偏高的像素较多。所以在图像增强中, 如何使颜色的饱和程度更符合人眼的视觉特性, 是图像增强和颜色恢复的关键问题。

首先, 通过计算 V 分量的亮度变化程度来判断 S 分量的颜色饱和状况。对于亮度增强十分明显的区域往往反映出该区域在增强前图像的饱和程度不够, 需要在增强后对它的 S 分量加以填充。其中 V 分量的亮度变化情况可以由下式描述

$$\alpha(x, y; p, q) = \frac{F_v(x, y)}{h_v(x - p, y - q)} \quad (21)$$

然后, 由亮度变化函数 $\alpha(x, y; p, q)$ 类比 S 分量 Zernike 矩的阶跃高度来确定饱和度调节因子的取值。对于亮度变化大于阶跃高度的部分, 一般是颜色较为相近的区域, 可以认为是同色连通域, 该区域的颜色饱和程度相近, 颜色的恢复主要由亮度的变化决定; 而对于亮度变化小于阶跃高度的部分, 主要是由于不同颜色的差异所造成的, 颜色的恢复主要由邻接像素的对比度决定, 其饱和度调节函数为

$$\chi(x, y) =$$

$$\begin{cases} \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 r(p, q) \alpha(x, y; p, q) k_s(x, y) \\ \bar{\alpha}(x, y) > k_s(x, y) \\ \sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 r(p, q) |h_s(x, y) - h_s(x - p, y - q)| \\ \bar{\alpha}(x, y) > k_s(x, y) \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\bar{\alpha}(x, y)$ 为亮度变化函数 3×3 窗口内的变化均值。通过饱和度调节函数 $\chi(x, y)$ 可以对 S 分量的进行调整, 从而得到 S 分量的增强图像

$$F_s(x, y) = \chi(x, y) \kappa f_s(x, y) \quad (23)$$

式中 $\kappa=0.5$, $f_s(x, y)$ 为原图像后的 S 分量。

3 实验结果与分析

实验选取了调色板图像、雾天图像、高动态范围图像, 低照度图像等几种图像增强中十分经典的实验素材, 而且选取了室内、室外, 不同光照条件, 不同背景的图像; 同时对图像在 HSV 空间中的亮度增强, 颜色的保持, 饱和度的提高进行了探讨。为了进行比较, 选取直方图均衡化和多尺度 Retinex (MSR) 算法进行实验比对, 而且对不同方法处理结果的数值特征进行了分析。

为了分析算法在图像增强的同时对颜色灰度的能力和对光照的适应能力, 实验选用了 5 幅不同光照条件下的调色板图像进行处理, 而且对调色板的位置进行了任意的放置, 处理结果如图 1 所示。

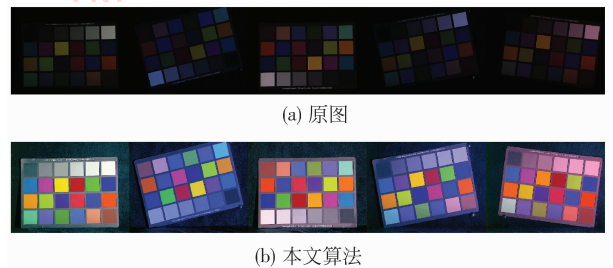


图 1 不同光照条件下调色板图像处理结果
Fig. 1 Original image and the results of different illumination

由实验结果可以看出本文方法对不同光照条件下的低照度图像都起到了良好的增强作用, 而且保持了原始图像的色彩信息, 对于亮度过低造成的颜色失真也进行了一定的恢复, 同时也提高了调色板子块中色彩的饱和度, 使处理的结果更符合人眼的

视觉效果。

为了分析本文算法对雾天图像增强的有效性,实验选取了 800×600 的雾天图像进行处理,在实验对比中本文选取了直方图均衡化和 MSR 作为比较,如图 2 所示。

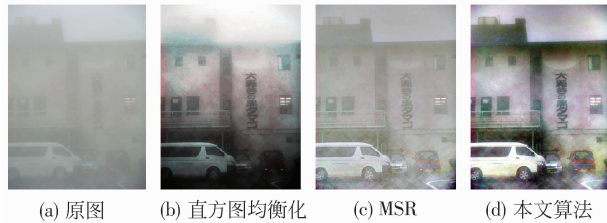


图 2 雾天酒店图像不同方法处理后的结果比较

Fig. 2 Comparison of the results of different methods on fog-degraded hotel image

从视觉效果上观察,直方图均衡化虽对原图有所增强,但对图像的明暗分布处理的并不理想,在天空的部分过亮,而在地面部分过暗。而对 MSR 的处理结果图像整体上有一定的增强,但对比本文算法还是出现了发灰,对比度不充分的不足。经本文算法处理后的结果可以明显看出在对比度上有明显增强,而且没有出现局部过亮或过暗的现象。从图像的直方图分布也可以看出本文方法将图像的灰度分布向低灰度值的区间进行了移动,而且有一定的均衡性,这反映在图像上则是消除了雾天图像泛白和增强了图像对比度的特点。

从实验数据上分析如表 1 所示,本文算法处理后的图像标准差明显增大,而且图像均值也明显降低。这表明本文算法在增强图像对比度,消除雾天图像泛白发灰的问题上起到了良好的效果。从表 1 可以看出,直方图均衡化的标准差明显较大。这是因为直方图均衡化是灰度统计分布的结果,反映在处理结果是图像的明暗范围增大,但对局部的对比度增强效果较差。从信息量的角度考虑,本文算法的信息熵也高于其他几种算法,这也说明该方法对图像信息的恢复起到了良好作用。

如图 3 所示,对于不同雾天环境,直方图均衡化的增强效果不是很协调,部分区域颜色出现了畸变,而 MSR 算法对雾天图像虽有所增强,但还是出现了整体发白的情况,本文算法处理后的图像在图像对比度增强,消除雾天图像泛白发灰的问题上起到了良好的效果,而且有效地保持了图像的色彩,更符合人眼的视觉感官。

表 1 雾天酒店图像不同方法处理的统计特征

Tab. 1 The statistic characteristic of different methods on fog-degraded hotel image

	平均值	标准差	熵
原图	163.392 5	2.970 8	6.321 7
直方图均衡化	127.350 7	64.857 4	6.986 5
MSR	143.910 7	35.201 4	6.963 4
本文算法	117.537 1	58.222 4	7.727 6

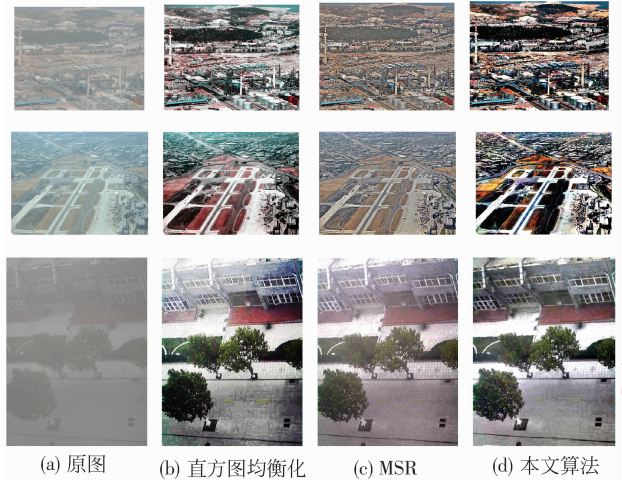


图 3 雾天图像不同方法处理后的结果比较

Fig. 3 Comparison of the results of different methods on fog-degraded image

如图 4 所示,对于低照度图像,直方图均衡化还是出现了增强不足,而 MSR 对图像颜色的保持也不是十分有效,经本文算法处理后的图像视觉效果明显增强,颜色也得到了很好地保真。

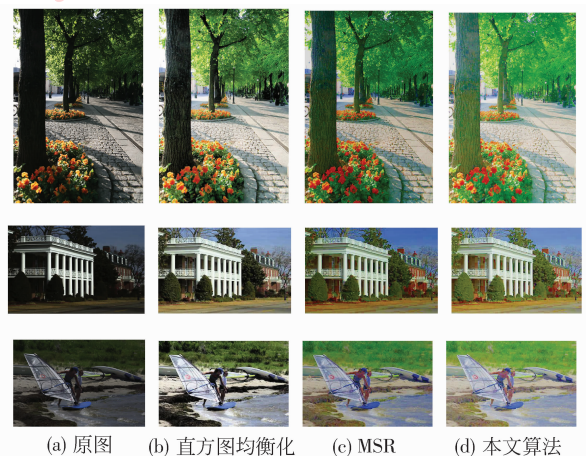


图 4 低照度图像不同方法处理后的结果比较

Fig. 4 Comparison of the results of different methods on low-illumination image

4 结 论

在 Retinex 理论框架下,通过 Zernike 正交多项式求解图像 HSV 空间中 S 分量和 V 分量的矩,计算出各分量的背景灰度和阶跃高度,然后通过调整邻近像素的可辨灰度差异,提取图像的照度信息。进而修正图像 S 分量的饱和度,达到恢复图像色彩,实现图像增强的目的。通过视觉观察和数据分析,算法在图像的整体增强,颜色的保持和光照恢复上都取得了良好的效果,而且对不同特点的图像都有较为良好的适应能力。

参考文献 (References)

- [1] Gonzalez R C. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 460-521. [Gonzalez. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 460-521.]
- [2] Land E, McCann J. Lightness and Retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [3] Funt B, Ciurea F, McCann J. Retinex in matlab [C]// Proceedings of the IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications. Scotland: SPIE, 2000: 112-121.
- [4] 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.
- [5] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for retinex[J]. Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [6] Ogata M, Tsuchiya T, Kubozono T, et al. Dynamic range compression based on illumination compensation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2001, 47(3): 548-558.
- [7] Agarwal V. Achieving Color Constancy and Illumination compensation[R]. Pennsylvania: ECE, 2003.
- [8] Shaked D. Interpolation of Non-Linear Retinex Type Algorithms [R]. Israel: HP Laboratories, 2006.
- [9] Choi D, Jang I H, Kim M H, et al. Color image enhancement based on single-scale retinex with a JND-Based nonlinear filter [C]//Proceedings of IEEE International Symposium Circuits and Systems. Washington DC, USA: IEEE, 2007: 3948-3951.
- [10] Sun Bo, Chen Weifang, Li Hongyu, et al. Modified luminance based adaptive MSR [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Image and Graphics. Chengdu: ICIG, 2007: 22-24.
- [11] Wang Wen, Li Bo, Zheng Jin, et al. A fast multi-scale retinex algorithm for color image enhancement [C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Washington DC, USA: IEEE, 2008: 30-31.
- [12] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [13] Ghosal S, Mehrotra R. Detection of composite edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(1): 14-15.
- [14] Li J Q, Wang J W, Chen S B, et al. Improved algorithm of subpixel edge detection using Zernike orthogonal moments[J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 500-503.