

有效消除光晕现象和颜色保持的彩色图像增强算法

肖 泉¹⁾, 采号^{1,2)*}, 王守觉^{1,3)}, 廖英豪¹⁾, 郭东辉¹⁾

¹⁾ (厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005)

²⁾ (厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

³⁾ (中国科学院半导体研究所神经网络研究室 北京 100083)

(xq_xmu@yahoo.com.cn)

摘 要: 由于对图像中明暗突变区域的背景光照估计不准确, 经典 Retinex 彩色图像增强算法易产生光晕现象且存在增强后图像细节信息减弱和颜色失真等不足. 为此, 结合人眼视觉特性提出一种彩色图像增强算法. 首先利用人眼对图像结构特征及颜色信息的敏感特性, 通过构造彩色双边滤波器来获取图像背景光照, 以避免光照突变处产生光晕现象; 其次依据人眼系统局部自适应调节特性, 通过引入一个对比度调节函数自适应增强图像的细节信息, 克服经典 Retinex 算法在整体对比度提高的同时局部对比度下降的不足; 最后利用一种线性的颜色恢复算法恢复增强所得亮度图像的颜色信息. 与 MSRCR 等彩色图像增强算法比较的实验结果表明, 文中算法更有效, 增强后的图像不仅细节清晰, 而且色彩鲜艳、自然.

关键词: 图像增强; 人眼视觉系统; Retinex; 彩色双边滤波; 局部对比度

中图分类号: TP391.41

A Halo-Free and Hue Preserving Algorithm for Color Image Enhancement

Xiao Quan¹⁾, Ding Xinghao^{1,2)*}, Wang Shoujue^{1,3)}, Liao Yinghao¹⁾, and Guo Donghui¹⁾

¹⁾ (School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

²⁾ (Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

³⁾ (Laboratory of Neural Network, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract: As the estimation of background luminance at the mutation of light is usually inaccurate, the traditional Retinex enhancement algorithms suffer from the halo phenomenon, as well as the loss of details and color distortion in the enhanced image. Based on the characteristics of the human visual system, a novel color image enhancement algorithm is proposed in this work. As the human visual system is sensitive to structural features and color information of image, a color-bilateral filter is constructed to estimate the background luminance, which can effectively overcome the halo phenomenon. Moreover, by using the local self-adjustment characteristic of the human visual system, a local contrast enhancement function is introduced to adaptively adjust the intensity of each pixel, to overcome the dilemma that the overall contrast is improved but the local contrast is reduced. Finally, a color restoration process is utilized to convert the enhanced intensity image back to the color image. Experimental results show that the proposed algorithm is more effective in terms of visual effects, and the enhanced image is not only more detail-preserving, but it is also more colorful and natural, compared with other methods such as MSRCR.

Key words: image enhancement; HVS; Retinex; color-bilateral filter; local contrast

收稿日期: 2009-07-28; 修回日期: 2009-12-07. 基金项目: 国家自然科学基金(30900328); 福建省自然科学基金(2008J0032, 2009J01301, 2009J01302); 厦门大学 985 二期信息创新平台资助项目(0009-X07204); 厦门市科技计划高校创新项目(3502Z20083006). 肖 泉(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理与模式识别; 丁兴号(1976—), 男, 博士, 副教授, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像处理、机器学习(dxh@xmu.edu.cn); 王守觉(1925—), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要研究方向为高维形象几何仿生信息学理论; 廖英豪(1960—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为图像处理; 郭东辉(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、模式识别.

图像增强是图像处理领域中的一个重要研究内容, 由于实际获得的图像往往存在光照不足或受照不均匀的情况, 会严重影响图像视觉质量. 因此, 需要对图像进行增强处理, 以满足人眼观察或后续处理的需要. 传统的图像增强方法大多针对灰度图像, 如直方图均衡、同态滤波和非线性映射等^[1].

彩色图像增强处理是近年来研究的一个热点问题, 由于彩色图像存在颜色信息, 因此在图像亮度和细节信息增强的同时还应保持颜色信息不失真, 使增强后的图像明亮、自然. 目前, 针对彩色图像增强较为常用的是基于颜色空间转换的增强方法^[2], 这类方法通常将原始 RGB 图像转换至某特定颜色空间下, 然后利用传统灰度图像增强算法直接作用于亮度分量, 最后再重新转换至 RGB 空间中实现增强. 由于对各个颜色分量处理不一致, 这类方法容易导致颜色失真.

一些学者从人眼视觉系统的感知特性出发提出多种彩色图像增强算法^[3-7], 其中基于颜色恒常特性^[3]的经典 Retinex 增强算法备受关注, 并已出现多种改进的 Retinex 增强算法^[4-7], 这些算法的侧重点都是集中在如何有效地估计图像的背景光照分量上, 以文献[4]所提 MSRCR 算法(多尺度中心环绕 Retinex 结合颜色恢复算法)最为典型. 随着研究的进一步深入, 人们又提出多种基于 Retinex 思想的改进彩色图像增强算法^[8-10], 如 Li 等^[8]利用人眼的视觉感知特性, 依据类似 Retinex 增强原理采用自适应指数调节的方法, 取得了非常不错的增强效果, 但在图像轮廓处容易产生光晕现象. 为此, 本课题组基于高维仿生信息学理论提出一种仿生彩色图像增强算法^[10], 它在色彩复原、局部细节增强及光晕消除方面均取得了不错的效果, 但该算法在光照突变较强的地方光晕现象没有完全消除, 还有待改进.

本文旨在研究光照不足或不均匀的彩色图像增强问题, 并提出一种新的彩色图像增强算法. 该算法在经典 Retinex 增强算法基础上, 利用人眼视觉系统的局部感知特性和局部自适应调节原理提出改进, 并结合一种线性颜色恢复算法^[8]得到彩色图像增强算法. 实验结果表明, 本文算法能有效地增强图像的局部细节信息、恢复图像的色彩信息, 并且能克服光照突变处的光晕现象.

1 经典 Retinex 增强算法

经典 Retinex 增强算法可由数学公式描述为

$$F_c(x_i) = \sum_{n=1}^N \alpha_n [\log I_c(x_i) - \log \hat{I}_{c,n}(x_i)],$$

其中,

$$\hat{I}_{c,n}(x_i) = W_n \otimes I_c(x_i), \quad c \in \{r, g, b\};$$

$x_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$ 为像素点坐标; I_c 为观测图像中已归一化的某个通道分量; F_c 为该通道分量增强后的输出; $\hat{I}_{c,n}$ 为 I_c 在第 n 尺度下的背景光照估计, 它可由输入图像与高斯核 W_n 卷积得到; α_n 为第 n 尺度的权值, 满足 $\sum \alpha_n = 1$.

目前, 经典 Retinex 增强算法主要存在以下不足: 1) 采用高斯滤波估计图像背景光照分量时, 由于高斯核函数各向同性的本质, 将会导致光照突变区域的背景光照估计不准确, 从而导致光晕现象; 2) 在对数空间中直接将原始图像减去背景光照分量, 虽然实现了图像全局亮度调整和整体对比度提升, 但图像的局部对比度随之减弱; 3) 一般是对原彩色图像三元色进行直接处理, 易使得三元色增幅不一而引起颜色失真, 且计算量也较大.

2 本文彩色图像增强算法

针对上述经典 Retinex 算法的不足, 本文提出以下措施: 首先, 利用人眼对图像结构特征及颜色信息的敏感特性, 通过构造各向异性的彩色双边滤波代替高斯滤波, 以克服经典算法对光照突变区域的背景光提取不准确问题; 其次, 依据人眼的局部自适应调节原理^[11], 通过一个局部对比度调节函数改善由于对数运算导致的局部对比度减弱问题; 最后采用先增强图像亮度分量, 后进行颜色恢复的思路, 克服经典算法易使三元色比例失衡的问题. 本文算法的数学表示形式为

$$F_{lum}(x_i) = \log I_{lum}(x_i) - L(x_i) \log \hat{I}_{lum}(x_i) \quad (1)$$

$$F_c(x_i) = f(I_c, I_{lum}, F_{lum}), \quad c \in \{r, g, b\} \quad (2)$$

其中, I_{lum} 和 F_{lum} 为增强前后图像的亮度分量, \hat{I}_{lum} 为利用彩色双边滤波获得的背景光照估计分量, $L(\cdot)$ 为本文构造的局部对比度调节函数, $f(\cdot)$ 则表示一种线性颜色恢复算法.

2.1 基于彩色双边滤波的背景光照估计

对于图像背景光照分量的估计, 经典 Retinex 增强算法利用各向同性的高斯滤波器对原始图像滤波获得. 当图像边缘处发生光照突变时, 难以准确地获得当前点所在区域的背景光照, 从而产生光晕现象.

为此,本课题组利用双边滤波提取图像的背景光照.双边滤波是一种各向异性的滤波器,由于同时利用了当前点和邻域像素点的空间相近性和灰度值相似性,使其较好地考虑到图像中光照突变的情况,能在一定程度上克服光晕现象.利用双边滤波估计背景光照分量的数学形式表示为

$$\hat{I}_{\text{lum}}(x_i) = \sum_{x_j \in \Omega_i} W_1 W_2 I_{\text{lum}}(x_j) \sum_{x_k \in \Omega_i} W_1 W_2 \quad (3)$$

其中, Ω_i 表示以 x_i 为中心的邻域窗口; W_1 和 W_2 分别是距离高斯核和灰度值高斯核,它们分别定义为

$$W_1(x_j, x_i) = \exp\left\{-\frac{(x_j - x_i)^T(x_j - x_i)}{2\sigma_1^2}\right\},$$

$$W_2(x_j, x_i) = \exp\left\{-\frac{[I_{\text{lum}}(x_j) - I_{\text{lum}}(x_i)]^2}{2\sigma_2^2}\right\},$$

σ_1 和 σ_2 是核函数的尺度控制参数.

尽管采用双边滤波估计背景光照分量取得了相当不错的效果,但通过实验发现此方法仍存在一些不足:当图像中存在光照突变过于强烈的特征时,往往出现过增强现象,它主要体现在图像光照突变处增强后会出现过亮或过暗的线条状特征,说明上述双边滤波方法对于光照突变的区分仍有待改进.事实上,对于灰度图像,人眼主要通过邻域各像素点的亮度水平不同来感知图像结构信息;而对于彩色图像,当图像某边缘处两侧亮度水平相当时,仅利用亮度信息可能已无法将边缘区分出来,此时若能通过像素点间颜色信息的不同则可实现有效区分.为此,本文在上述双边滤波基础上再利用图像的颜色信

息,通过构造彩色双边滤波来估计背景光照,具体形式为

$$\hat{I}_{\text{lum}}(x_i) = \sum_{x_j \in \Omega_i} W_1 W_2 W_3 I_{\text{lum}}(x_j) \sum_{x_k \in \Omega_i} W_1 W_2 W_3.$$

其中, W_1 和 W_2 与上述双边滤波方法形式一致; W_3 则由原彩色图像的颜色信息来构造,即

$$W_3(x_j, x_i) = \exp\left\{-\frac{[U(x_j) - U(x_i)]^2 + [V(x_j) - V(x_i)]^2}{2\sigma_3^2}\right\},$$

σ_3 为对应的尺度控制参数, U 和 V 表示将原始图像变换至 YUV 空间分别提取的色差与饱和度分量.

图 1 所示为对实验中的 Tree 图像分别采用高斯滤波、双边滤波和本文彩色双边滤波方法获得的背景光照图.可以看出,高斯滤波方法性能最差,由于其各向同性的本质,在光照突变处估计不准确,这是导致光晕现象的重要原因;双边滤波方法由于考虑了图像的灰度值属性,性能有所提高,但从图 1c 可知,对于亮度水平相近的区域,该方法仍不能对其进行有效区分(如草地与树荫分界处);而本文彩色双边滤波方法则能很好地克服这一点,如图 1d 所示,由于在双边滤波基础上还考虑了图像的颜色信息,使所估计的背景光照能保持很好的区域间断性.通过实验发现,对于彩色双边滤波器参数的选择,计算中参数取 Ω 窗口大小为 45, $\sigma_1 = 15$, $\sigma_2 = 0.3$, $\sigma_3 = 0.04$ 左右是合适的.

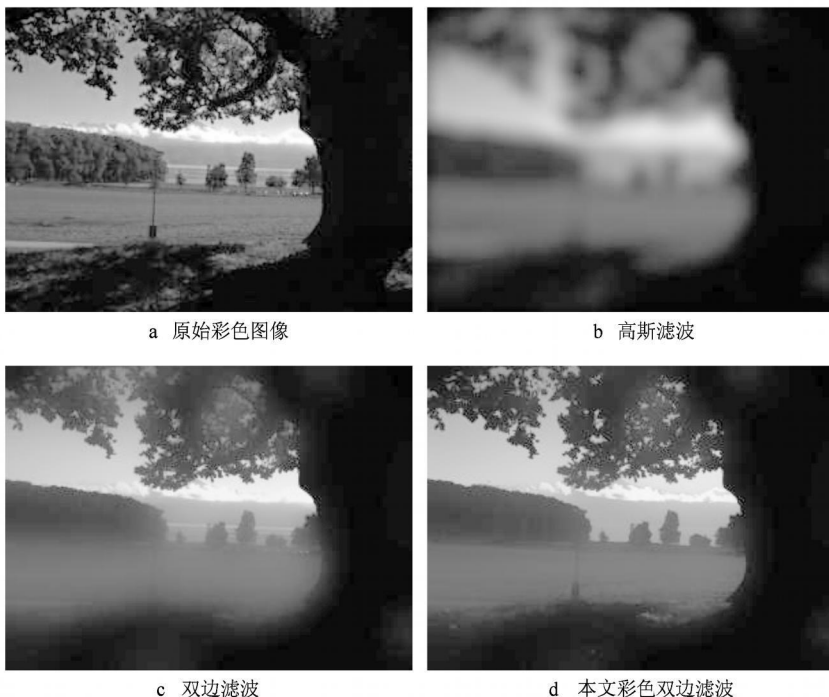


图 1 不同背景光照估计方法性能比较

2.2 自适应局部对比度增强

经典 Retinex 增强算法采用对数变换压缩图像动态范围, 同时图像的细节信息也随之减弱, 在对数空间中直接从原图像中减去背景光照分量(是一种全局处理方式)能够实现图像整体对比度提升, 但局部细节信息并没有得到改善. 为此, 本文通过引入一个局部对比度调节函数, 目的在于使图像整体对比度提高的同时局部对比度也得到增强. 邻域当前点的明暗程度可作为局部对比度的一种描述手段, 即当前点亮度与背景光照的差异越大, 则局部对比度越高. 因此, 通过拉大两者间的差异可望达到局部对比度增强的目的. 若当前点为亮点, 则仍令该点保持较高的亮度; 反之, 当前点为暗点, 则通过调节使该点更暗, 以实现局部对比度增强.

不同于其他局部对比度调节方法, 本文是将构造的对比度调节函数作用于背景光照分量上, 目的在于通过调整背景光照分量的权重对不同像素点进行不同程度的调节, 所构造的局部对比度调节函数形式为

$$L(x_i) = 1 - \lambda \sin\left\{ \varphi(x_i) \cdot \frac{\pi}{2} \right\} \quad (4)$$

其中, 取参数 $\lambda = 0.95$; $\varphi(\bullet)$ (已归一化) 为邻域当前点明暗程度的一种度量方式, 一般可直接采用对数空间下的观测图像的亮度分量, 即 $\varphi(\bullet) = \log I_{lm}(\bullet)$. 然而由于观测图像取对数后细节信息已经减弱, 因此采用这种方式并不能准确地反映局部邻域当前点的明暗程度. 为此, 本文利用当前点亮度与邻域背景光照的比值关系, 通过对对数空间下的亮度分量进行指数调节来修正当前点的明暗程度, 调整方式为 $\varphi(x_i) = (\log I_{lm}(x_i))^\gamma$; 其中 $\gamma = \frac{I'(x_i)}{I_{lm}(x_i)}$, 为当前点背景光照分量与原图像亮度的比值.

图 2 所示为局部对比度调节函数的曲线图, 可以看出, 所构造的局部对比度调节函数根据明暗程

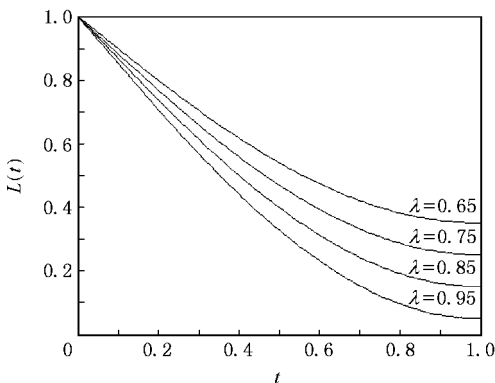


图 2 局部对比度函数曲线图

度不同的像素点分别对其背景光照分量赋予不同的权重, 从而实现增强后图像在满足整体对比度提高的同时局部对比度也得到增强.

2.3 颜色恢复

对于彩色图像增强, 若直接对三元色分别进行处理易导致各分量增幅不一, 从而引起颜色失真. 为此, 文献[8]利用彩色图像三元色间的线性比例关系来保持图像的颜色信息, 基于此思想, 结合第 2.1, 2.2 节所提算法给出本文的彩色图像增强算法, 图 3 所示为其流程示意图.

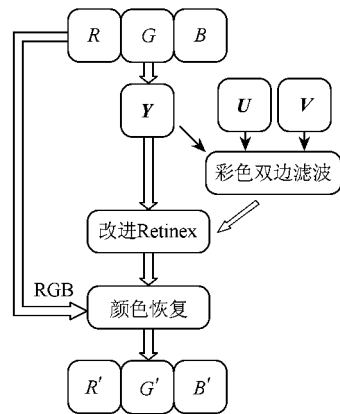


图 3 本文彩色图像增强算法流程示意图

本文算法大致分为如下 3 个步骤:

Step1. 将原始彩色图像变换至 YUV 空间中, 提取亮度分量 Y, 并利用 U 和 V 分量构造彩色双边滤波器.

Step2. 利用式(1)对 Y 分量进行增强处理得到 \hat{Y} .

Step3. 利用式(2)对增强的亮度分量进行颜色恢复, 其中所采用的线性颜色恢复算法, 通过 $F_c(x_i) = f(I_c, Y, \hat{Y}) = I_c(x_i) \frac{\hat{Y}(x_i)}{Y(x_i)}$ 来实现.

由上可知, 增强后三元色间保持线性比例关系不变, 从而能有效地保持图像的颜色信息, 克服经典 Retinex 增强算法容易导致颜色失真的不足.

3 实验结果与分析

为验证本文彩色图像增强算法的有效性, 我们在实验中选择了几幅高动态范围、但显示对比度较差的彩色图像^①用于比较分析. 图 4 所示为采用本文算法进行增强处理后的部分效果图, 可以看出, 图像动态范围得到压缩, 在全局亮度增强的同时凸显了图像的细节信息, 且颜色鲜艳、自然, 说明了本文算法的有效性.

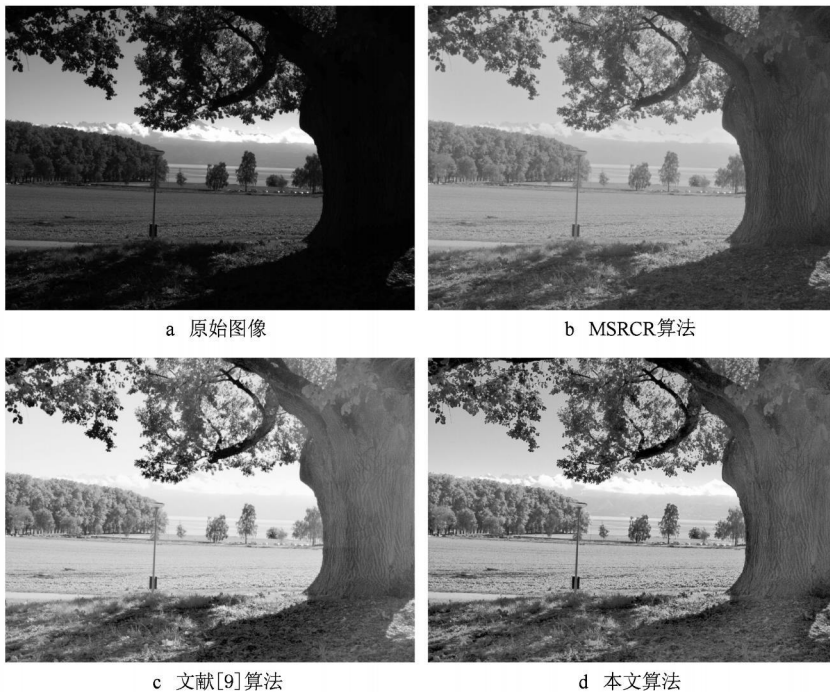
^① http://ivrg.cofl.ch/supplementary_material/LM_adaptiveFilter/index.html



图 4 本文算法对不同图像的增强效果

图 5 所示为 Tree 图像的实验效果图, 其中采用了经典的 MSRCR 算法及文献[9]算法(基于 Retinex 结合自适应滤波)作为比较. 由图 5 可以看出, 3 种算法均取得了一定的增强效果, 但本文算法的整体视觉效果最佳. MSRCR 算法效果较差, 图像颜色整体发

灰, 尽管亮度水平得到一定提高, 但局部对比度较差; 文献[9]算法则亮度水平整体过亮, 颜色恢复不如本文算法, 局部对比度也更差些, 如 Tree 图像中的白云、草地等; 本文算法则取得了相对较好的效果, 所得增强后的图像不仅细节清晰, 且色彩明亮、生动.



a 原始图像

b MSRCR算法

c 文献[9]算法

d 本文算法

图 5 3 种算法增强效果比较 1

图 6 所示为 Auto 图像的实验效果图, 其中用于比较的算法有基于全局非线性映射结合自适应指数调节^[8]和文献[10]算法. 可以看出, 文献[8]算法能够取得较好的局部对比度提升, 但会增强一些错误信息导致过增强, 使较暗区域反而更暗, 如 Auto 图像中铁杆、地板及树叶阴影; 文献[10]算法中由于采用了双边滤波用于估计背景光照, 使得过增强现

象得到一定改善, 但仍不够彻底, 如图像中地板和树叶阴影边缘处仍有部分暗点, 导致图像整体视觉感受不够自然; 本文算法则有效地克服了这一点, 由于采用了彩色双边滤波方法, 较准确地提取了图像背景光照分量, 有效地克服了过增强现象, 使得增强后的图像整体视觉感受非常自然.

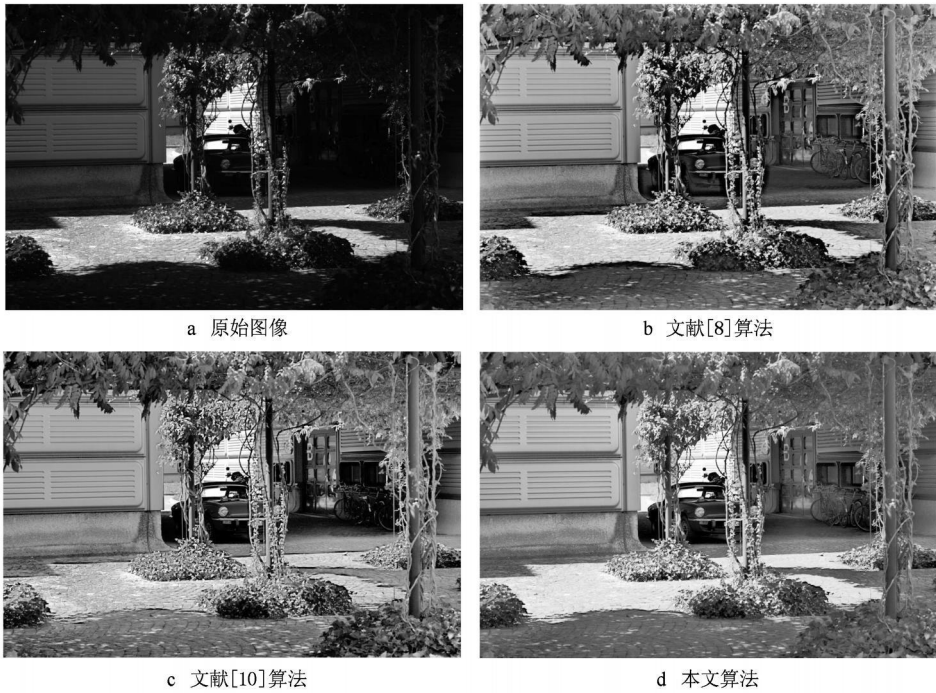


图 6 3 种算法增强效果比较 2

图 7 所示为针对 Tree 图像, 基于本文算法分别采用高斯滤波、双边滤波和本文彩色双边滤波所得整体和局部效果(远处树梢部分)对比图。由图 7 可以看出, 双边滤波较高斯滤波性能有所改善, 但树梢

顶部及树干左侧仍存在部分暗点, 影响整体视觉质量; 而利用彩色双边滤波则使暗点基本消除, 过增强现象得到有效改善, 说明了本文彩色双边滤波方法的有效性。

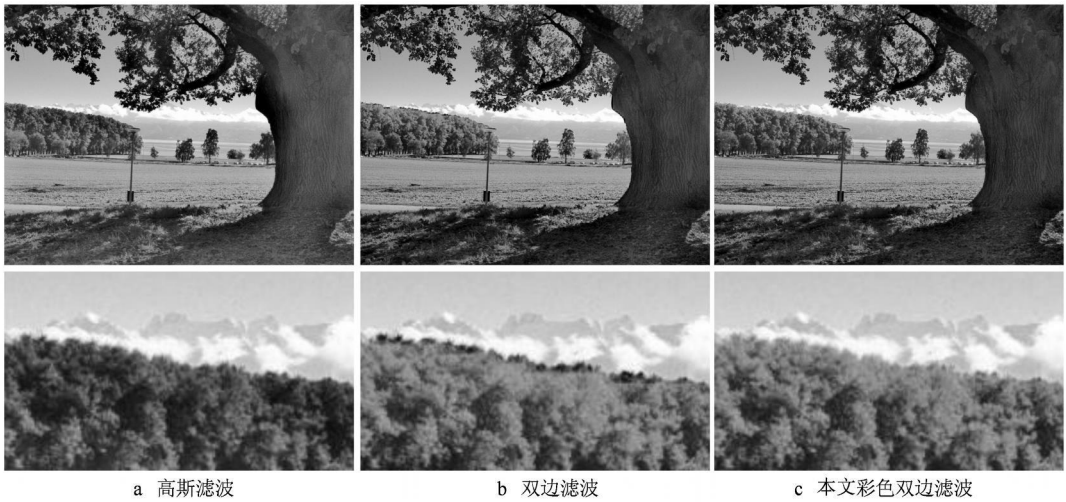


图 7 不同背景光照估计方法的增强效果比较

值得一提的是, 尽管本文算法在光晕消除和颜色保持方面具有一定优势, 获得了较好的整体视觉效果, 但也存在一些不足: 局部对比度增强虽优于文献[9]算法, 但不如文献[10]算法, 主要体现在对于原图像中本身较亮的区域往往出现过增强现象, 如 Tree 图像中白云及 Auto 图像中地板等区域的细节

信息反而有所减弱。这主要是由于算法的局部对比度调节方法性能差异导致的, 说明本文算法所构造的局部对比度调节函数仍有待改进。

由于彩色图像增强的目的大多用于满足人眼观察的需要, 因此对增强质量的评价主要通过主观上来衡量。对于客观指标, 本文选择全局亮度增强水平

(采用图像均值)和局部对比度增强水平两方面来衡量,局部对比度增强指标^[10]定义为 $CI = \bar{C}(F) / \bar{C}(I)$; 其中, $\bar{C}(\cdot)$ 为将图像分成互不重叠的 5×5 规则小图块,并计算所有小图块对比度的均值。小图块对比度定义为 $(P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min})$, 其中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别代表小图块的最大和最小像素值。

表 1 所示为 Tree 和 Auto 图像各种算法的客观性能比较,可以看出,5 种算法的客观性能与主观视觉感受基本一致。MSRCR 算法亮度水平有所提高,但局部对比度效果最差。文献[8]和文献[10]算法局部对比度增强效果较好,文献[9]算法亮度水平相对较高但局部对比度增强要差一些,而本文算法则对亮度水平和局部对比度同时取得了相对较好的效果。

表 1 Tree 和 Auto 图像客观性能比较

	Tree		Auto	
	均值	CI	均值	CI
原图	34.64		29.71	
MSRCR 算法	85.50	0.62	87.27	0.52
文献[8]算法	80.78	1.34	81.38	1.08
文献[9]算法	111.70	0.84	103.00	0.70
文献[10]算法	80.99	1.48	85.09	1.15
本文算法	93.55	1.06	95.51	0.91

4 结 语

本文提示了一种新的彩色图像增强算法。由于人眼对彩色图像的特征信息除了通过像素点间亮度水平差异,还通过颜色信息的不同来感知,因此提出一种彩色双边滤波方法来获取图像背景光照,更好地考虑了图像光照突变的情况,有效地克服了光晕现象。此外,由于人眼系统具有局部自适应调节特性,因此通过一个局部对比度调节函数有效地增强了图像的局部细节信息。最后结合一种线性颜色恢复算法有效地保持了增强后图像的颜色信息。相关实验结果表明,本文算法能有效地克服光晕现象,且增强后的图像明亮生动,颜色自然,具有较好的整体视觉效果。

参考文献(References):

- [1] Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian, *et al.* Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 353-356 (in Chinese)
(秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾, 等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 353-356)
- [2] Tan K, Oakley J P. Enhancement of color images in poor visibility conditions [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, 2000*: 788-791
- [3] Land E H. The Retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108-128
- [4] Jobson D J, Rahman Z U, 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
- [5] Kimmel R, Elad M, Shaked D, *et al.* A variational framework for Retinex [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 52(1): 7-23
- [6] Choudhury P, Tumblin J. The trilateral filter for high contrast images and meshes [C] // *Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, Leuven, 2003*: 1-11
- [7] Xu Xin, Chen Qiang, Pheng Ann Heng, *et al.* A fast halo-free image enhancement method based on Retinex [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(10): 1325-1331 (in Chinese)
(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)
- [8] Li T, Asari V K. A robust image enhancement technique for improving image visual quality in shadowed scenes [M] // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2005, 3568: 395-404
- [9] Meylan L, Süsstrunk S. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2820-2830
- [10] Wang Shoujue, Ding Xinghao, Liao Yinghao, *et al.* A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(10): 1970-1973 (in Chinese)
(王守觉, 丁兴号, 廖英豪, 等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. *电子学报*, 2008, 36(10): 1970-1973)
- [11] Webster M A. Human colour perception and its adaptation [J]. *Network: Computation in Neural Systems*, 1996, 7(4): 587-634