

## 基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法

常 戩, 白佳弘

(辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘 要:** 针对单尺度 Retinex 算法存在光晕现象、噪声放大现象以及图像泛灰的不足, 基于回转对称双边滤波, 提出一种 Retinex 图像增强算法。采用回转对称双边滤波估计光照图像, 并消除其对视觉效果的影响, 得到反映图像本质属性的反射图像, 有效去除光晕现象。运用 Otsu 阈值分割算法确定图像的阈值, 并依此判断图像的亮、暗区域, 采用双边滤波对这些区域进行不同程度的去噪处理, 在去除噪声的同时能够较好地保留图像细节。采用分段线性变换增强低对比度区域的对比度, 改善图像泛灰的不足。实验结果证明, 与单尺度 Retinex 算法、基于双边滤波的 Retinex 算法相比, 该算法能够有效去除光晕现象, 明显改善噪声放大现象, 获得更为丰富的图像信息, 从而增强图像的对比度。

**关键词:** 图像增强; Retinex 算法; 回转对称双边滤波; Otsu 算法; 图像去噪; 分段线性变换

**中文引用格式:** 常 戩, 白佳弘. 基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(6): 265-273.

**英文引用格式:** Chang Jian, Bai Jiahong. Retinex Image Enhancement Algorithm Based on Rotational Symmetric Bilateral Filtering[J]. Computer Engineering, 2016, 42(6): 265-273.

## Retinex Image Enhancement Algorithm Based on Rotational Symmetric Bilateral Filtering

CHANG Jian, BAI Jiahong

(School of Software, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China)

**[Abstract]** Aiming at the shortage that single scale Retinex algorithm has the halo phenomenon, noise amplification phenomenon and image graying, based on rotational symmetric bilateral filtering, this paper proposes a Retinex image enhancement algorithm. The illumination images are estimated with bilateral filtering invariant to rotation and their influence on visual effect is removed to get the reflecting images' attributes, which can overcome the halo phenomenon effectively. Then threshold values are determined by Otsu threshold segmentation algorithm to judge the bright areas and dark areas of images, and the noise in these areas is removed to varying degrees by bilateral filtering, which can remove noise as well as reserve image details. The contrast in low contrast regions is enhanced with piecewise linear transformation, which can improve the insufficient about grey phenomenon of images. Experimental results show that the proposed algorithm can remove the halo phenomenon effectively, improve the noise amplification phenomenon significantly, get more abundant image information and enhance the contrast of images, which is better than the single scale Retinex algorithm and the Retinex algorithm based on bilateral filtering.

**[Key words]** image enhancement; Retinex algorithm; rotational symmetric bilateral filtering; Otsu algorithm; image denoising; piecewise linear transformation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.06.047

### 1 概述

图像是人类获取信息的主要途径之一, 然而受光照、设备等外界因素的影响, 人们所获取的图像的质量往往会有所下降。通过图像增强手段改善图像的质量, 对于人类理解图像内容以及机器对图像信息的识别和后续处理具有重要的意义。图像

增强是指运用数学手段对图像进行加工, 突出图像中感兴趣物体, 同时抑制无用信息, 提高图像清晰度, 使其结果对于特定应用比原始图像更合适的一种图像处理技术<sup>[1]</sup>。常用的图像增强方法包括线性变换、对数变换、伽马校正、直方图均衡、直方图规定化、反锐化掩模法、同态滤波等, 这些方法简单易实现, 但单独使用时往往难以满足特定应用的

**作者简介:** 常 戩 (1979 - ), 男, 副教授、博士, 主研方向为数字图像处理; 白佳弘, 硕士研究生。

**收稿日期:** 2015-06-10    **修回日期:** 2015-08-02    **E-mail:** 19398985@qq.com

要求。

Retinex 理论是由美国物理学家 Edwin Land 提出的一种自适应图像增强理论<sup>[2]</sup>。该理论是基于色彩恒常性模型提出的,色彩恒常性是指人眼对物体色彩的感知不受光照条件的影响,具有恒定性<sup>[3]</sup>。随后,在这一理论的基础上,学者们又提出了许多改进算法,例如:基于同态滤波的 Retinex 算法<sup>[4]</sup>,基于多重迭代策略的 FMR (Frankle\_McCann Retinex) 算法<sup>[5]</sup>等。20 世纪 90 年代,文献[6]提出了中心/环绕 Retinex 算法,并在此基础上形成了单尺度 Retinex 图像增强算法、多尺度 Retinex 图像增强算法等。单尺度 Retinex 算法凭借其增强效果显著、简单易实现等优点成为 Retinex 理论最为常见的实现形式,得到了越来越广泛的应用。然而,单尺度 Retinex 图像增强算法存在 3 个方面的缺点:在明暗对比强烈处存在光晕现象<sup>[7-8]</sup>;增强图像细节的同时,也增强了图像的噪声<sup>[9]</sup>;增强后的图像对比度较低,图像整体泛灰<sup>[10]</sup>。

近年来,为克服光晕现象,一些学者提出了一种基于双边滤波的 Retinex 图像增强算法,比如:文献[11]提出用双边滤波器进行光照图像估计,并根据 Retinex 原理,消除光照对人脸图像的影响;文献[12]提出用双边滤波代替高斯核函数进行光照估计,并采用韦博定律对图像邻域内点与中心点的亮度差进行判断,克服了光晕现象。然而结合双边滤波的 Retinex 算法仍然存在噪声放大以及图像对比度下降的不足,需要通过后续处理来改进这些不足。

基于上述不足,本文提出一种基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法。该算法采用回转对称双边滤波进行光照图像估计,有效去除光晕现象;运用最大类间方差法(Otsu)算法确定图像的阈值,并以此为依据,对图像中像素值大于阈值的较亮区域以及像素值小于阈值的较暗区域进行不同程度的降噪处理,在很大程度上改善噪声增强现象;采用分段线性变换增强图像低对比度区域的对比度,克服图像泛灰问题。

## 2 Retinex 算法

Retinex 是 Retina(视网膜)和 Cortex(脑皮层)的合成词。由此可知,Retinex 理论就是模仿人类视网膜和大脑皮层的工作模式提出的<sup>[13]</sup>。该理论认为人们所观察到的图像是由光照图像和反射图像两部分组成的,即:

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

其中, $S(x,y)$ 表示原始图像; $L(x,y)$ 表示光照图像; $R(x,y)$ 表示反射图像。通常来说,光照图像反映了环境和光照强度等低频信息,而反射图像则反映了

图像轮廓、纹理等高频信息<sup>[14]</sup>。

Retinex 算法的目的是要从原始图像中减少甚至消除光照图像(包含光照强度、周围环境等影响因素)的影响,得到反映图像本质属性的反射图像,从而达到图像增强的效果。在实际实现时,人们通常将像素值转换到对数域来计算。一方面,可以将复杂的乘除法转换为简单的加减法,简化了运算;另一方面,对数域的数据更加有利于人眼对图像信息的感知<sup>[15]</sup>,其工作过程可由下式表示:

$$R(x,y) = \log_a S(x,y) - \log_a L(x,y) \quad (2)$$

其中, $L(x,y)$ 为光照图像,如何估计光照图像是 Retinex 图像增强算法的核心问题,在单尺度 Retinex 算法中,其表达式为:

$$L(x,y) = S(x,y) * F(x,y) \quad (3)$$

其中,\*表示卷积运算; $F(x,y)$ 为高斯核函数,即:

$$F(x,y) = \lambda \times e^{-(x^2+y^2)/\sigma^2} \quad (4)$$

其中, $e$ 为常量且 $e \approx 2.71828$ ; $\sigma$ 为高斯环绕尺度; $\lambda$ 为归一化系数,需要满足:

$$\iint F(x,y) dx dy = 1 \quad (5)$$

由于 Retinex 图像增强算法去除了光照图像对图像视觉效果的影响,因此类似于人类视觉系统对不同光照条件下的图像具有恒定的观察和识别能力。该算法对于光照不均匀图像具有显著的增强效果,但其仍然存在以下不足:

(1) 由于假设图像光照变化是均匀的,而现实情况往往不能满足这一要求<sup>[16-17]</sup>,导致在图像边缘等明暗对比强烈处产生光晕现象。

(2) 在输入的原始图像质量不高,存在一定噪声的情况下,使用 Retinex 图像增强算法增强后的图像中,噪声也得到了明显的增强,影响图像的视觉效果,也为特征提取、模式识别等后续处理带来不便。

(3) 在增强后的图像中,对应于原图像中较暗区域的图像细节得到显著增强,但对应于原图像中非暗区域的部分对比度较低,图像出现整体泛灰的现象。

## 3 本文算法

针对单尺度 Retinex 算法存在的光晕现象、噪声放大现象以及增强后图像对比度较低的不足,本文提出基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法。该算法首先采用较传统双边滤波具有更好的去除光晕效果的回转对称双边滤波来代替传统单尺度 Retinex 算法中的高斯核函数进行光照图像估计,有效去除了光晕现象。然后,运用 Otsu 阈值分割算法估计图像的阈值,并以此为依据确定图像的亮、暗区域,运用具有边缘保持效果的双边滤波去噪方法对图像亮、暗区域的噪声进行不同程度的

去除。最后,采用分段线性变换的方法对增强后的图像进行后续处理,增强了图像中低对比度区域的对比度,使增强后的图像更加自然,提升了图像的清晰度。

基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法流程图如图 1 所示,其实现步骤如下:

(1) 用回转对称双边滤波估计光照图像  $L(i, j)$ 。

(2) 将图像灰度值转换到对数域,并根据下式得到反射图像  $R(i, j)$ ,为了使所得图像更加自然,引入参数  $k(0 < k < 1)$ <sup>[18]</sup>。

$$R(i, j) = \log_a S(i, j) - k \times \log_a [L(i, j)] \quad (6)$$

(3) 对反射图像用下式进行线性拉伸,将图像灰度值拉伸到  $[0, 255]$  范围内。

$$d(i, j) = \frac{R(i, j) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \times (255 - 0) \quad (7)$$

其中,  $R_{\min}, R_{\max}$  分别表示  $R(x, y)$  的最小值和最大值;  $d(i, j)$  表示拉伸到  $[0, 255]$  范围内的反射图像。

(4) 针对增强后图像的噪声放大现象,采用 Otsu 阈值分割算法确定图像阈值,并运用双边滤波器对像素值小于阈值的较暗区域和像素值大于阈值的较亮区域分别进行不同程度的去噪处理。

(5) 针对增强后图像对比度较低、图像泛灰的现象,采用分段线性变换处理图像,得到结果图像  $f(i, j)$ 。

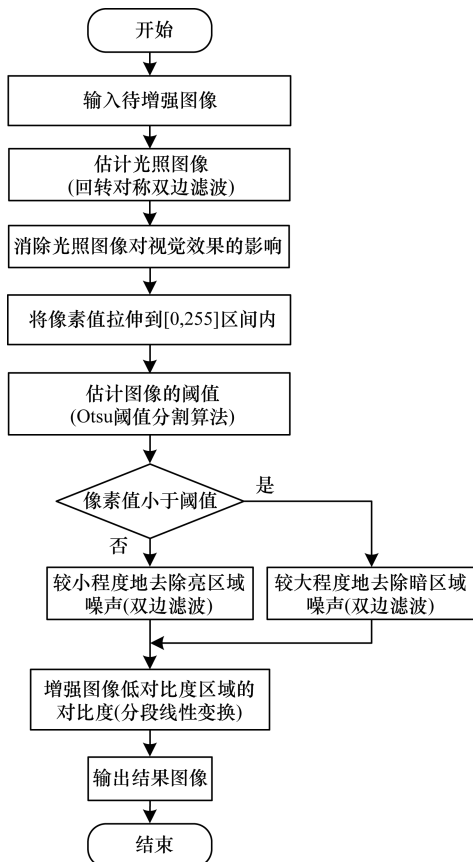


图 1 基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法流程

### 3.1 光照图像估计

针对单尺度 Retinex 算法存在的光晕现象,本文算法采用回转对称双边滤波进行光照图像估计。

单尺度 Retinex 算法运用高斯核函数进行光照图像估计,仅考虑了像素点在空间距离上的关系,而没有考虑到图像边缘两侧像素亮度的差异程度,导致图像边缘两侧的像素相互影响,产生光晕现象。双边滤波对高斯滤波进行了改进,它在高斯滤波的基础上加入一个与像素点亮度之间的差异程度相关的系数,其公式表示如下:

$$f(i, j) = \frac{\sum_{m=i-p}^{i+p} \sum_{n=j-p}^{j+p} d(m, n) \times \alpha \times \beta}{\sum_{m=i-p}^{i+p} \sum_{n=j-p}^{j+p} \alpha \times \beta} \quad (8)$$

其中,  $d(i, j)$  表示输入图像;  $f(i, j)$  表示输出图像;  $p$  表示滤波窗口的大小。当  $p = q$  时,滤波窗口为  $(2 \times q + 1) \times (2 \times q + 1)$ ,  $\alpha$  是对相邻像素之间几何距离的度量,  $\beta$  是对相邻像素之间像素值的差异程度的度量,分别表示为:

$$\alpha = e^{-\sigma_d \times ((i-m)^2 + (j-n)^2)} \quad (9)$$

$$\beta = e^{-\sigma_l \times (d(i, j) - d(m, n))^2} \quad (10)$$

其中,  $\sigma_d$  为距离差尺度参数;  $\sigma_l$  为亮度差尺度参数。在图像亮度变化平缓的区域,滤波邻域内像素之间的亮度差异程度很小,当亮度差趋近于 0 时,  $\beta$  趋近于 1,此时双边滤波器等同于普通的高斯滤波器,能够消除平缓区域的噪声。而在亮度对比较为强烈的边缘区域,边缘同侧像素点的亮度差异较小,  $\beta$  趋近于 1;而边缘异侧像素点之间的亮度差异较大,  $\beta$  趋近于 0。因此,双边滤波能够确保滤波邻域内距离邻域中心点较近、与邻域中心点亮度差异较小的像素点对滤波效果影响较大,而距离邻域中心点较远、与邻域中心像素点亮度差异较大的像素点对滤波效果影响较小。因此,与高斯滤波相比,双边滤波能够改善边缘模糊现象,具有较好的边缘保持效果。

回转对称双边滤波是在传统双边滤波的基础上提出的一种改进算法,该算法针对传统双边滤波算法中与像素点空间距离相关的系数  $\alpha$  进行改进,改进后的系数表达式如下所示:

$$\alpha = \begin{cases} 1 - \sqrt{\frac{(i-m)^2 + (j-n)^2}{p}} & \sqrt{(i-m)^2 + (j-n)^2} \leq p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

当滤波邻域内像素点与滤波邻域中心像素点的距离小于  $p$  时,回转对称双边滤波利用与像素点间几何距离相关的权重系数  $\alpha$  来平滑图像的噪声,同时发挥与像素间亮度差相关的权重系数  $\beta$  的作用,在平滑图像噪声的同时,有效保护图像边缘;而当滤波邻域内像素点与滤波邻域中心像素点距离大于  $p$

时,表明该像素点距中心像素点较远,回转对称双边滤波则忽略对该像素点的处理,从而保持完好、平滑的图像边缘。

与传统双边滤波相比,在处理位于明暗对比强烈的边缘区域的像素点时,回转对称双边滤波仅处理边缘附近的点,而将滤波邻域内距离边缘较远的像素点的权重系数置零,消除了这些像素点对图像边缘的影响。使处理后的图像具有更为完整、清晰、连贯的边缘,且具有很好地去除光晕的效果。将回转对称双边滤波与 Retinex 图像增强算法相结合可以在有效增强图像细节信息的同时,提高图像边缘的清晰度,较好地去除光晕现象。

### 3.2 分区域去噪

运用回转对称双边滤波代替高斯核函数进行光照图像估计,有效地消除了光晕现象。然而,Retinex 算法在增强图像细节的同时,也增强了图像的噪声。特别是当输入图像质量不高,带有一定的噪声时,输出图像会带有明显的噪声,严重影响了图像的视觉效果和后续处理。因而,对增强后的图像进行去噪处理具有非常重要的意义。

图 2(a)是一幅大小为 512 像素 × 512 像素,带有少量高斯白噪声的灰度图像,图 2(b)显示了 Retinex 图像增强算法存在的噪声放大现象。由图像可知,在图 2(b)中,图像暗区域细节得到了很好的增强,但原图像中的噪声也得到了增强,图像视觉效果较差。若对图像进行全局去噪处理,容易产生过度平滑现象,导致图像细节丢失。文献[9]指出:在经 Retinex 算法增强后的图像中,噪声的放大程度并不是均匀的,位于原图像中较暗区域的噪声放大程度较大,而较亮区域噪声放大程度较小。因此,文献[9]提出仅对原图像中较暗区域进行去噪处理,能够去除图像中的大部分噪声,并提升处理速度。然而,经大量实验发现,这种方法对于暗区域较多的图像有很好的处理效果。当图像中亮区域较多时,仅对暗区域去噪的方法并不能很好地去除图像的噪声,且在亮暗区域交界处容易产生过渡不连贯的现象,影响图像的视觉效果。

为有效地克服 Retinex 算法在增强图像过程中产生的噪声放大问题,同时又要减少甚至避免由于图像过度平滑而导致的细节丢失现象,本文提出通过对图像中较亮区域和较暗区域设置不同的滤波参数的方法来控制去噪的程度,从而平衡噪声去除与细节保持之间的矛盾。

如何判断图像的亮、暗区域是此时要考虑的核心问题。Otsu 算法又称为最大类间方差法,是一种自适应阈值分割算法<sup>[19]</sup>。该算法首先获得图像的一维直方图,然后通过设定阈值  $T$  将图像的像素点

划分为目标类和背景类,计算出两类之间的最大类间方差,并以此作为合理阈值点的选取准则<sup>[20]</sup>。当阈值为  $t$  时,类间方差如下式所示。

$$v(t) = \omega_0 \times (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 \times (\mu_1 - \mu)^2 \quad (12)$$

其中,  $\omega_0$  为小于阈值  $t$  的像素在图像中所占的比例;  $\omega_1$  为大于阈值  $t$  的像素在图像中所占的比例;  $\mu_0$  为小于阈值  $t$  的像素的均值;  $\mu_1$  为大于阈值  $t$  的像素的均值;  $\mu$  为整幅图像的均值,其表达式为:

$$\mu = \omega_0 \times \mu_0 + \omega_1 \times \mu_1 \quad (13)$$

使得应用式(12)计算得到的  $v(t)$  取最大值的阈值  $t$  即为区分目标区和背景区的阈值点。图 2(c)显示了运用 Otsu 算法分割并二值化图 2(b)的结果图像,其中黑色部分表示像素值小于阈值  $t$  的一类,白色部分表示像素值大于阈值  $t$  的一类。由于 Retinex 算法对图像亮度进行了全局性增强,因此原图像中亮、暗区域的位置与增强后的图像保持一致。对比图 2(a)和图 2(c)可知,原图像中较暗区域即对应于图 2(c)中的黑色部分,而较亮区域则对应于白色部分。因此本文采用 Otsu 阈值分割算法来确定图像的阈值,并以此为依据对图像的亮、暗区域进行判断。

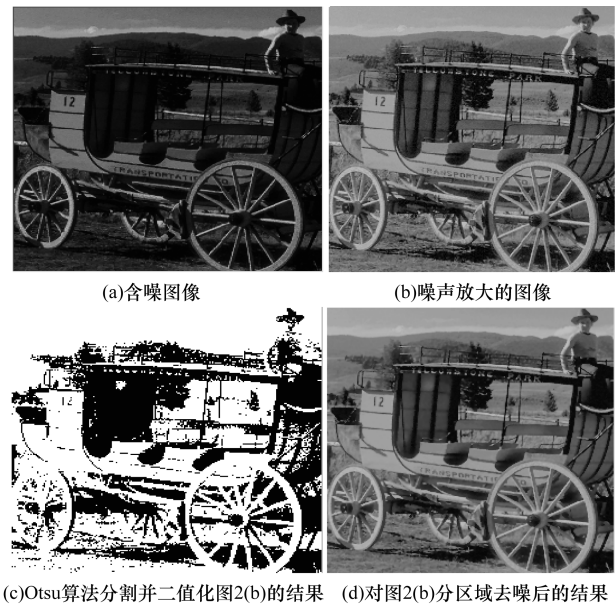


图 2 Retinex 算法噪声放大现象以及去噪效果

双边滤波是一种具有边缘保持效果的图像去噪算法,它能够在去除图像噪声的同时,较好地保持图像的边缘信息。式(8)中的  $p$  表示滤波窗口大小,参数  $p$  越大,图像的平滑程度就越大,图像噪声去除得越明显;与此同时,图像的模糊程度也越大,图像细节丢失得越多。此外,距离差尺度参数  $\sigma_d$  和亮度差尺度参数  $\sigma_l$  取值太小,会导致图像过度平滑,取值太大则会减弱去噪效果。适当地调整  $p$ ,  $\sigma_d$  和  $\sigma_l$  的值可以在过度平滑和噪声去除之间达到平衡,从而

控制图像的去噪强度。因此,本文采用双边滤波器来滤除图像中放大的噪声,同时依据图像中亮、暗区域噪声放大的程度,对它们设置不同的滤波参数来控制去噪处理的强度,进而在有效去除噪声的同时较好地保留图像的细节。图 2(d) 显示了运用不同参数的双边滤波对图 2(b) 中亮、暗区域分别进行去噪处理的效果图,对于图像中较暗区域取  $p = 2$ , 对于图像中较亮区域取  $p = 1$ , 距离差尺度参数  $\sigma_d = 0.01$ , 亮度差尺度参数  $\sigma_l = 0.001$ 。由图像可知, Retinex 算法放大的噪声得到了有效去除,且较好地保留了图像的细节信息。

### 3.3 对比度增强

运用回转对称双边滤波估计光照图像,并采用不同参数的双边滤波分别对图像亮、暗区域进行降噪处理,显著增强了图像暗区域细节,有效改善了噪声放大现象,同时获得了清晰、无光晕的边缘。然而,此时的图像仍然存在着对比度下降、图像泛灰的问题,如图 2(d) 所示。为进一步改进图像的视觉效果,本文提出采用分段线性变换的方法增强图像低对比度区域的对比度。

分段线性变换是一种通过对不同灰度区间应用不同的变换函数来突出感兴趣目标,同时抑制不感兴趣目标的处理方法。比较常用的分段线性变换方法是三段法,其数学表达式如下:

$$f(i, j) = \begin{cases} k_1 \times d(i, j) & 0 \leq d(i, j) < a \\ b + k_2 \times d(i, j) & a \leq d(i, j) \leq c \\ d + k_3 \times d(i, j) & c < d(i, j) \leq 255 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $d(i, j)$  表示入力图像;  $f(i, j)$  表示出力图像;  $k_1, k_2$  和  $k_3$  分别表示 3 段变换的斜率,它们的表达式如下:

$$k_1 = \frac{b}{a} \quad (15)$$

$$k_2 = \frac{d - b}{c - a} \quad (16)$$

$$k_3 = \frac{255 - d}{255 - c} \quad (17)$$

其中,  $(a, b)$  和  $(c, d)$  表示分段线性变换斜率发生变化的临界点,分段线性变换的原理如图 3 所示。

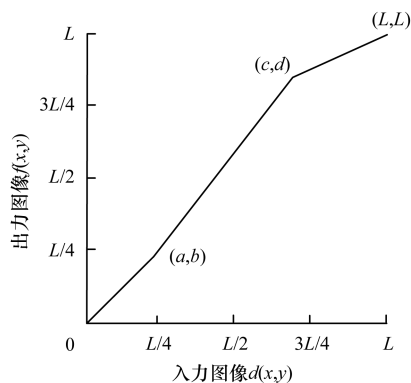


图 3 分段线性变换原理示意图

分段线性变换具有灵活的特点,用户可以根据个人需要在不同程度上增强特定目标的灰度细节,相反地对不感兴趣的区域加以抑制。由图 2(d) 可知,在应用结合回转对称双边滤波的 Retinex 算法处理后的图像中,车子后方、车夫的腿部等原图像中暗区域得到了显著的增强,而天空、车身等原图像中非暗区域对比度下降,图像泛灰。因而,本文算法所采用的分段方法是将  $[0, 255]$  区间内的灰度值划分为以下 3 段:  $[0, L/4], [L/4, 3L/4], (3L/4, L]$ , 其中,  $L = 255, [0, L/4]$  区间对应于图像中较暗区域,  $[L/4, 3L/4]$  区间对应于图像中灰度值居中的大部分区域,而  $(3L/4, L]$  区间则对应于图像中灰度值较高的少数较亮区域。依据经 Retinex 理论处理后的图像的特征,本文算法使灰度值处于  $[0, L/4)$  的暗区域灰度值保持不变,对灰度值处于  $[L/4, 3L/4]$  范围内的大部分区域进行增强,为使图像灰度值仍处于  $[0, 255]$  区间内,对灰度值处于  $(3L/4, L]$  范围内的极少数像素点进行压缩。为了使图像低对比度区域得到最大程度的增强,而图像内各像素点的像素值又保持在  $[0, 255]$  范围内,需满足  $b < d < L$ , 即  $b < k_2 \times (c - a) + b < L$ , 因此,在本文算法中  $k_1, k_2$  和  $k_3$  的取值范围分别为:

$$k_1 = 1 \quad (18)$$

$$1 < k_2 < \frac{3}{2} \quad (19)$$

$$k_3 < 1 \quad (20)$$

图 4 显示了图 2(d) 中图像在应用本文分段线性变换处理前后的直方图对比情况。

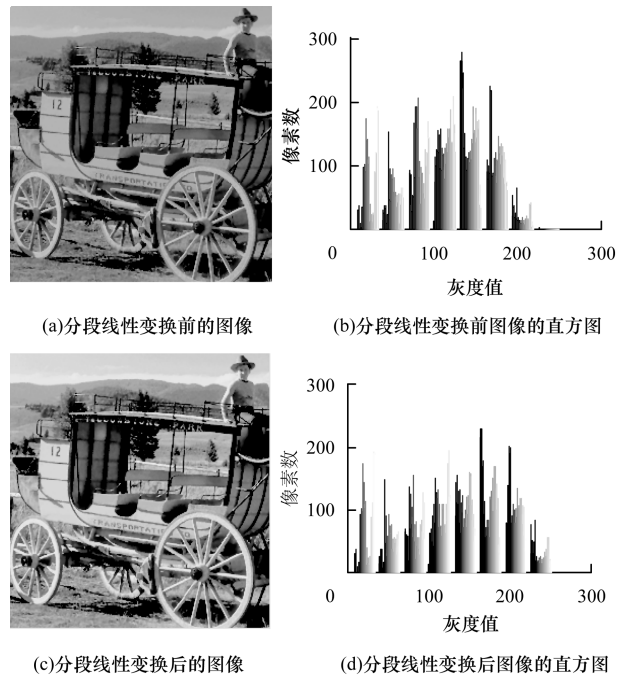


图 4 本文分段线性变换处理前后的图像及其直方图对比

从图像上看,分段线性变换前,图像车子后板等暗区域的对比度较好,而车身、车轮等原图像中较明亮的

区域对比度下降;分段线性变换后,图像暗区域得到了保持,且车身等对比度较低的区域也得到了很好的增强。从直方图上看,分段线性变换前,直方图的分量集中在灰度值低于 200 的一端;分段线性变换后,直方图的分量相对均匀地分布于整个[0,255]灰度区间。分段线性变换增强了图像低对比度区域的对比度,有效改善了 Retinex 算法存在的泛灰现象。

### 4 实验结果与分析

光照不均匀图像以及雾霾图像的增强是 Retinex 图像增强算法的重要应用。为验证本文算法的有效性,对 2 幅光照不均匀图像、2 幅雾霾图像以及它们添加了高斯白噪声的含噪图像分别进行仿真实验,并将实验结果与单尺度 Retinex 算法和基于双边滤波的 Retinex 算法进行比较。最后,采用主观视觉观察和客观数据分析相结合的评估方法对实验结果进行评估。

实验平台为 CPU 双核 2.30 GHz,内存为 4 GB,实验环境为 Microsoft Visual C++ 6.0,操作系统为 Windows 7,32 位操作系统。在实验中,回转对称双边滤波估计光照图像的参数: $p = 5$ (滤波窗口大小为  $11 \times 11$ ),亮度差尺度参数  $\sigma_l = 0.001$ ;双边滤波去噪的参数:较亮区域, $p = 1$ (滤波窗口大小为  $3 \times 3$ );较暗区域, $p = 2$ (滤波窗口大小为  $5 \times 5$ ),距离差尺度参数  $\sigma_d = 0.01$ ,亮度差尺度参数  $\sigma_l \in [0.001, 0.005]$ 。

#### 4.1 主观视觉观察

主观视觉观察是一种简单、直观且有效的评估方法。为验证本文算法的有效性,首先对 girl(大小为  $256 \times 256$ )、cabin(大小为  $400 \times 300$ )2 幅干净的光照不均匀图像以及 traffic(大小为  $500 \times 330$ )、island(大小为  $926 \times 840$ )2 幅干净的雾霾图像进行增强实验,实验结果分别如图 5 ~ 图 8 所示。

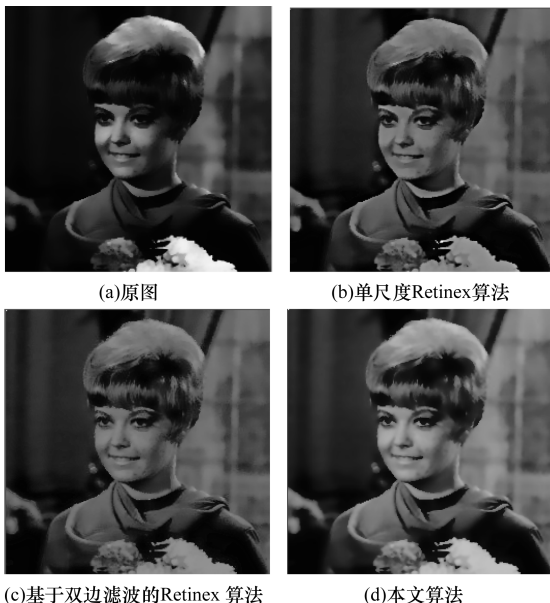


图 5 不同算法对光照不均匀图像 girl 的处理结果

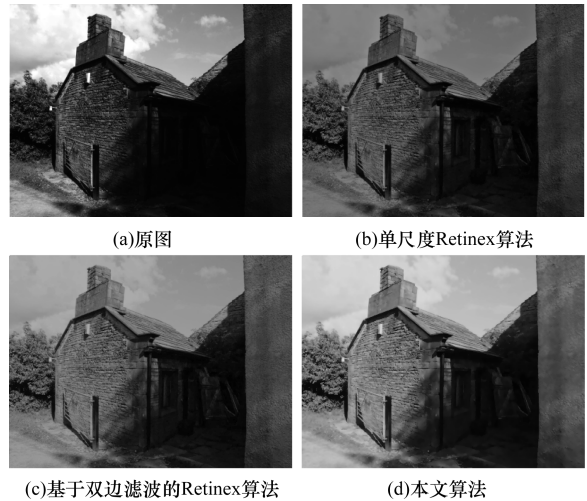


图 6 不同算法对光照不均匀图像 cabin 的处理结果



图 7 不同算法对雾霾图像 traffic 的处理结果

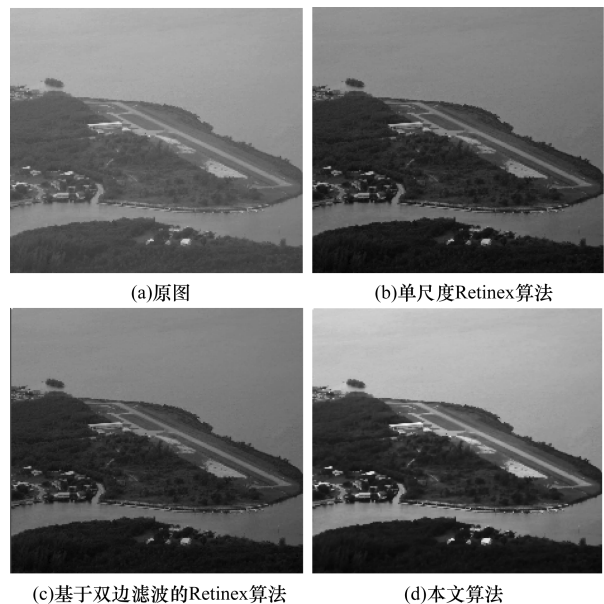


图 8 不同算法对雾霾图像 island 的处理结果

由 4 组实验对比图像可知,经传统单尺度 Retinex 算法处理后的图像易产生光晕现象,比如:

图 5(b)中小女孩头顶的边缘、图 6(b)中屋顶和墙壁的边缘、图 7(b)中大客车的顶部,图 8(b)中岛的边缘等区域,而基于双边滤波的 Retinex 算法以及本文算法有效去除了光晕现象。此外,经传统单尺度 Retinex 算法以及基于双边滤波的 Retinex 算法处理后的图像都存在对比度较低的现象,而在经本文算法处理后的图像中,图像低对比度区域的对比度得到了增强。

然而,在实际情况中,受环境、光照、设备等因素的影响,人们获得的图像往往并不是干净的,通常都带有不同程度的噪声。为模拟实际应用条件并验证本文算法对于含噪图像的增强效果,对上述实验中的原始图像均加以少量的高斯白噪声,实验结果如图 9 ~ 图 12 所示。观察结果图像可知,当输入图像含有噪声时,单尺度 Retinex 算法和基于双边滤波的 Retinex 算法存在明显的噪声放大现象,图像视觉效果较差。而本文算法能够在克服光晕现象、增强图像低对比度区域的对比度的同时,有效改善噪声放大现象,具有较好的图像增强效果。



(a)原图



(b)含噪图像



(c)单尺度Retinex算法



(d)基于双边滤波的Retinex算法



(e)本文算法

图 9 不同算法对含噪光照不均匀图像 girl 的处理结果



(a)原图



(b)含噪图像



(c)单尺度Retinex算法



(d)基于双边滤波的Retinex算法



(e)本文算法

图 10 不同算法对含噪光照不均匀图像 cabin 的处理结果



(a)原图



(b)含噪图像



(c)单尺度Retinex算法



(d)基于双边滤波的Retinex算法



(e)本文算法

图 11 不同算法对含噪雾霾图像 traffic 的处理结果

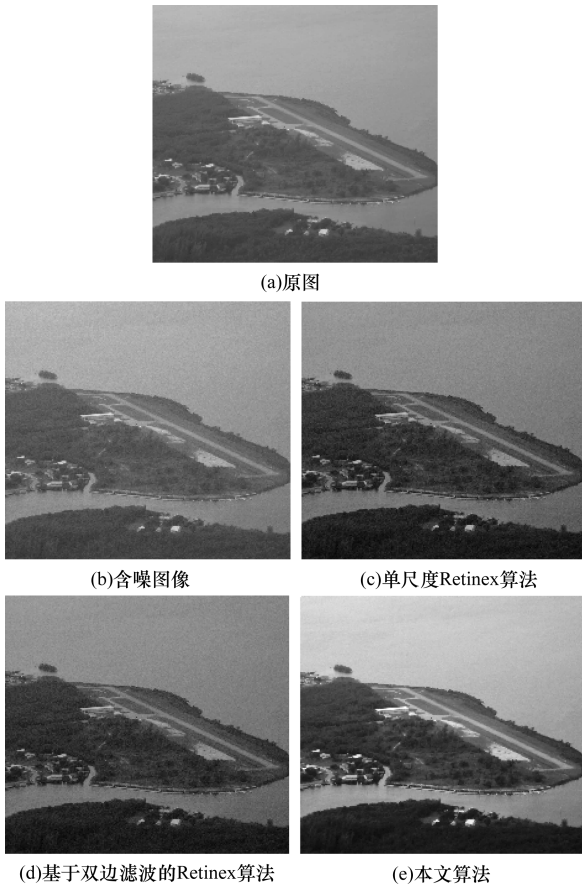


图 12 不同算法对含噪雾霾图像 island 的处理结果

## 4.2 客观数据分析

主观视觉观察方法可以比较直观准确地评价不同图像增强方法的效果,但它在一定程度上会受到人类主观意识的影响,因而对图像增强效果的评估还需要客观数据的支持。本文采用均值、标准差和信息熵作为客观评价指标。

(1) 均值用于评价图像的整体亮度,图像均值  $mean$  的计算公式如下所示:

$$mean = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)}{M \times N} \quad (21)$$

其中,  $f(i,j)$  表示图像像素点的像素值;  $M$  和  $N$  分别表示图像的长和宽。

(2) 标准差用于评价图像的对比度,标准差越大,图像的对比度就越高,图像标准差  $std$  的计算公式如下所示:

$$std = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - mean]^2} \quad (22)$$

(3) 图像的信息熵用于评价图像所包含信息的丰富程度,信息熵越大,表示图像中包含的信息越丰富,图像信息熵<sup>[21]</sup>  $H$  的计算公式如下所示:

$$H = - \sum_{l=0}^{255} p(l) \times \lg p(l) \quad (23)$$

其中,  $p(l)$  表示图像内像素值为  $l$  的点所占的

比例。

表 1 ~ 表 4 分别表示了 girl, cabin, traffic 和 island 4 幅含噪图像在运用不同增强算法增强后的图像的均值、标准差和信息熵的对比情况。

表 1 不同算法对含噪光照不均匀图像 girl 的结果数据对比

| 算法              | 均值     | 标准差   | 信息熵  |
|-----------------|--------|-------|------|
| 含噪图像            | 59.11  | 52.69 | 7.23 |
| 单尺度 Retinex     | 81.15  | 43.60 | 7.26 |
| 基于双边滤波的 Retinex | 84.87  | 41.88 | 7.22 |
| 本文算法            | 102.99 | 54.51 | 7.59 |

表 2 不同算法对含噪光照不均匀图像 cabin 的结果数据对比

| 算法              | 均值     | 标准差   | 信息熵  |
|-----------------|--------|-------|------|
| 含噪图像            | 84.95  | 77.97 | 7.57 |
| 单尺度 Retinex     | 86.68  | 45.76 | 7.24 |
| 基于双边滤波的 Retinex | 107.31 | 53.33 | 7.41 |
| 本文算法            | 128.11 | 69.76 | 7.76 |

表 3 不同算法对含噪雾霾图像 traffic 的结果数据对比

| 算法              | 均值     | 标准差   | 信息熵  |
|-----------------|--------|-------|------|
| 含噪图像            | 187.50 | 20.11 | 6.25 |
| 单尺度 Retinex     | 115.87 | 28.93 | 6.73 |
| 基于双边滤波的 Retinex | 112.79 | 28.83 | 6.72 |
| 本文算法            | 138.18 | 40.93 | 7.20 |

表 4 不同算法对含噪雾霾图像 island 的结果数据对比

| 算法              | 均值     | 标准差   | 信息熵  |
|-----------------|--------|-------|------|
| 含噪图像            | 146.42 | 35.99 | 6.77 |
| 单尺度 Retinex     | 116.37 | 42.93 | 7.01 |
| 基于双边滤波的 Retinex | 115.89 | 42.80 | 7.01 |
| 本文算法            | 142.79 | 62.31 | 7.40 |

观察表中数据可知:在均值方面,光照不均匀图像经单尺度 Retinex 算法、基于双边滤波的 Retinex 算法以及本文算法处理后的结果图像的均值呈递增趋势。而雾霾图像由于具有泛白的特点,原图像亮度较高,经单尺度 Retinex 算法和基于双边滤波的 Retinex 算法增强后的图像均值较低,经本文算法处理后的图像均值有所提升,但仍低于原始图像;在标准差方面,4 组图像经传统单尺度 Retinex 算法和基于双边滤波的 Retinex 算法处理后的图像标准差均较低,而经本文算法增强后的图像标准差较前 2 种算法得到了提升;在信息熵方面,本文算法处理结果的信息熵均要高于其他 2 种算法。由客观数据分析可知,本文算法在亮度、对比度以及信息丰富程度方面均取得了较好的效果。

## 4.3 算法复杂度分析

在算法的运算复杂度方面,由于光照图像估计是 Retinex 理论相关算法的核心操作,在单尺度

Retinex 算法、基于双边滤波的 Retinex 算法以及本文算法中,频度最高的基本操作均为光照图像估计,因此 3 种算法具有相同的运算复杂度,且光照图像估计部分的操作决定着算法的运算效率。

单尺度 Retinex 算法运用高斯核函数进行光照图像估计,只考虑与像素间几何距离相关的参数,运算效率较高;基于双边滤波的 Retinex 算法在此基础上增加了与像素间像素值的差异程度相关的参数,运算效率有所下降;本文算法虽然增加了分区域去噪和分段线性变换的操作,但在光照图像估计部分所使用的回转对称双边滤波忽略了对距离邻域中心点较远的像素点的处理,在一定程度上提高了算法的运算效率。

为比较算法的实时性,对单尺度 Retinex 算法、基于双边滤波的 Retinex 算法以及本文算法处理单幅图像的耗时情况进行了测试,实验结果如表 5 所示。观察表中数据可知,本文算法的实时性低于单尺度 Retinex 算法,但高于基于双边滤波的 Retinex 算法。

表 5 不同算法处理单幅图像的耗时对比

| 图像   | 尺寸/像素     | 单尺度 Retinex/s | 基于双边滤波的 Retinex/s | 本文算法/s |
|------|-----------|---------------|-------------------|--------|
| 图 9  | 256 × 256 | 0.563         | 1.089             | 0.936  |
| 图 10 | 400 × 300 | 1.000         | 1.962             | 1.678  |
| 图 11 | 500 × 330 | 1.364         | 2.680             | 2.223  |
| 图 12 | 926 × 840 | 6.259         | 12.564            | 10.455 |

## 5 结束语

本文提出一种基于回转对称双边滤波的 Retinex 图像增强算法,采用回转对称双边滤波估计光照图像,运用 Otsu 阈值分割算法确定图像的阈值,依此对图像的亮、暗区域分别进行不同程度的去噪处理,并通过分段线性变换增强图像低对比度区域的对比度。实验结果表明,相比于传统的单尺度 Retinex 算法,本文算法能有效去除光晕现象,显著改善噪声放大现象,并克服对比度下降的不足,具有更好的图像增强效果。但本文算法还不能很好地满足实时性要求且没有具体应用到某一领域。因此,下一步工作将对如何提升算法的实时性进行研究,并尝试根据不同领域图像的特征有针对性地改进算法并将其应用到人脸识别、夜间彩色图像增强、图像去雾以及高光图像增强等特定应用领域中。

## 参考文献

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 3 版. 北京:电子工业出版社,2011.
- [2] Land E, McCann J J. Lightness and Retinex Theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [3] 张明,白松浩,邢姗姗. 基于金字塔分解的自动色彩均衡算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(2): 215-223.
- [4] Faugeras O D. Digital Color Image Processing Within the Framework of a Human Visual Model[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1979, 27(4): 380-393.
- [5] Frankle J A, McCann J J. Method and Apparatus for Lightness Imaging: USA, 4384336[P]. 1983-05-17.
- [6] Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A. Properties and Performance of a Center/Surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [7] 周扬,孙瑾,牛森. 一种基于改进 Mean Shift 滤波的 Retinex 彩色图像增强算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(S1): 160-163.
- [8] 陈薇,赵方田,陈侃,等. 改进单尺度 Retinex 的光照人脸识别[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(12): 151-154.
- [9] 沈丰,赵宇明. 基于实时 Retinex 与双边滤波的图像增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(11): 234-258.
- [10] 李莹. 基于 Retinex 理论的图像增强算法研究[D]. 西安:西北大学, 2014.
- [11] 杨大为,王琛. 一种人脸识别中的光照补偿方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(S1): 123-125.
- [12] 陈超. 改进单尺度 Retinex 算法在图像增强中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4): 55-74.
- [13] 傅雪阳. 基于变分框架的 Retinex 图像增强方法研究[D]. 厦门:厦门大学, 2014.
- [14] 方帅,杨静荣,曹杨,等. 图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 748-755.
- [15] 马超玉. 光照不均匀条件下图像增强算法研究[D]. 长春:长春理工大学, 2014.
- [16] 李骛. 基于 Retinex 模型的图像增强算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.
- [17] 吴伟玉. 基于局部双边滤波的实时 Retinex 图像增强[D]. 合肥:安徽大学, 2013.
- [18] 纪则轩,陈强,孙权森,等. 基于双边滤波的单尺度 Retinex 图像增强算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(10): 99-102.
- [19] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [20] 徐长新,彭国华. 二维 Otsu 阈值法的快速算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(5): 1258-1260.
- [21] 苟小珊,梁正友. 一种新的小波融合的乳腺图像增强方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(1): 201-235.

编辑 顾逸斐