Retinex自适应反射分量估计和对数图像处理减法后处理的低照度图像增强

潘卫琼 涂娟娟 干宗良 刘 峰

(南京邮电大学江苏省图像处理与图像通信重点实验室 南京 210003)

摘 要 在夜间采集到的图像由于受强灯光的影响,对比度较大,白天采集到的背光图像也是如此。对比度增强算法是常用的获得良好对比度图像的方法,但是这往往会造成亮区域过度增强的现象。为了解决对比度较大的这部分图像过度增强的问题,提出了一种基于Retinex自适应反射分量估计和对数图像处理减法后处理的低照度图像增强算法,该算法分为两部分:反射分量估计,基于对数图像处理减法(LIPS)模型的对比度增强。首先,用自适应双边滤波器代替传统的高斯滤波器来获得更精准的照明层。然后,根据最小可觉差(JND)阈值得到一个自适应因子来为对数域的照明分量加权,从而估计出图像的反射分量。这种方法可以有效防止高亮度区域的过度增强。最后,将基于标准偏差最大化的LIPS方法作用在反射层以增强图像的对比度,其中LIPS的参数范围由反射图像的累积分布函数(CDF)来确定。实验结果表明,文中所提算法在主观评价以及客观评价方面都优于其他对比算法。

关键词 反射分量估计,对数图像处理减法(LIPS),最小可觉差,标准偏差最大化

中图法分类号 TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.08.054

Low Light Images Enhancement Based on Retinex Adaptive Reflectance Estimation and LIPS Post-processing

PAN Wei-qiong TU Juan-juan GAN Zong-liang LIU Feng

(Jiangsu Province Key Lab on Image Processing and Image Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract Due to the influence of strong light, the images acquired at night have high contrast, the same situation also appears in backlit images collected in the daytime. Contrast enhancement method is usually applied to the images for obtaining images with favorable contrast. Whereas, over-enhancement commonly occurs in bright regions. Accordingly, in order to solve the problem of over-enhancement for high contrast images, a Retinex based low light image enhancement algorithm through adaptive reflection component estimation and logarithmic image processing subtraction post-processing was proposed. The algorithm mainly includes into two parts: reflection component estimation and logarithmic image processing subtraction (LIPS) enhancement. First, adaptive parameter bilateral filters are used to get more accurate illumination layer data, instead of Gaussian filter. Moreover, the weighting estimation method is used to calculate the adaptive parameter to adjust the removal of the illumination and obtain the reflectance by just-noticeable-distortion (JND) factor. In this way, it can effectively prevent the over-enhancement in high-brightness regions. Then, the LIPS method based on maximum standard deviation of the histogram is applied to enhance reflectance component part, where the interval of the parameter is according to the cumulative distribution function (CDF). Experimental results demonstrate that the proposed method outperforms other competitive methods in terms of subjective and objective assessment.

Keywords Reflectance estimation, Logarithmic image processing subtraction, Just-noticeable-distortion, Maximum standard deviation

1 引言

图像增强技术是图像处理领域的研究热点,其目的是改善图像的视觉效果。在现实生活中,有很多地方都需要用到视觉效果较好的图像,但是由于各种原因,并非所有采集的图像都满足要求。因此,有必要针对不同的应用场合,有效突显

到稿日期:2018-07-31 返修日期:2018-12-18 本文受国家自然科学基金(60802021,61172118,61271240,6147120),江苏省高校自然科学重点研究项目(13KJA510004),江苏省自然科学基金青年基金(BK20130867),江苏省高校自然科学研究项目(12KJB510019)资助。

潘卫琼(1992—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理和计算机视觉;涂娟娟(1994—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理与计算机视觉;干宗良(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为分布式视频编码和图像视频信号处理等,E-mail:ganzl@njupt.edu.cn(通信作者);刘 峰(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理与网络视频通信、高速DSP与嵌入式应用系统设计等。

目标图像的整体或局部特性，提高图像的质量，丰富图像内容，并使图像易于识别和进行后期处理。在各种应用中例如视频监控、医学图像处理等，图像增强非常必要。然而，在低光照条件下捕获的图像通常具有低动态范围，并且噪声会严重影响图像的质量。还有一些图像由于受强光的干扰，某些区域会出现过亮的情况，导致图像对比度高。在这种情况下，为了获得具有良好对比度和细节的图像，就需要各种低光照图像处理技术。近年来，低光照图像增强方法已得到了广泛的研究，常用的方法包括直方图均衡法[1]、基于 Retinex 的方法[2]、基于反转图像去雾的方法[3]以及基于对数图像处理增强的方法[4]。在这些方法中，Retinex 理论运用得最为频繁。Retinex 理论首先由 Land 提出[5]，假设人眼观察到的场景是物体反射和光照的产物，用于模拟人类视觉系统的图像处理。近年来已有许多基于 Retinex 的图像增强算法被提出，例如单尺度 Retinex(SSR)[6]、多尺度 Retinex(MSR)[7]和带颜色恢复的 MSR(MSRCR)[8]。随后，Kimmel 等提出了一种基于变分的 Retinex 图像增强方法[9]，与传统的 Retinex 方法相比，其效果有了很大的改善。他将先前的照明近似估计问题转换为二次规划求最优解的问题，通过梯度下降法计算图像照度，并利用伽马校正来增强目标图像。Ng 等使用总变分的概念来描述变分框架下的反射特性[10]，并将反射带入解模型以获得理想的反射图像。Fu 等在 Kimmel 和 Ng 方法的基础上提出了光照和反射的加权变分模型[11]，该算法得到的反射图像可以保留高频细节。此外，基于对数图像处理(LIP)模型的方法近些年也受到了广泛的重视，Jourlin 等提出了一种基于抽象线性数学的数学框架对数图像处理模型[12]。LIP 模型包含几个特定的代数操作，可用于操纵有界范围内的图像强度值。

本文基于 Retinex 理论与对数图像处理模型提出了一种针对高对比度低照度彩色图像增强算法，算法的处理步骤在 HSV 彩色空间的 V 通道进行。首先，本文采用自适应双边滤波器代替传统的高斯滤波器对原始图像进行滤波平滑，近似地估计出图像的照度分量。然后，根据人眼对亮度的敏感程度来对照度分量进行加权，其中人眼对亮度的敏感度由最小可觉差(JND)得到。接着，运用 Retinex 理论估计图像的反射分量。利用本文的反射分量估计方法，图像的动态范围得到了自适应压缩，从而达到了减轻图像亮区域过度增强的目的。最后，该算法选用对数图像处理减法(LIPS)模型来增强图像的对比度。因为模型中参数的选取会很大程度地影响图像的增强效果，所以本文利用反射分量的累积分布直方图将参数限定在某一范围之内，再利用增强图像的直方图标准偏差最大化的方法自适应得到最佳增强图像。本文提出的算法框架如图 1 所示，第 3 节给出了具体的实现步骤。

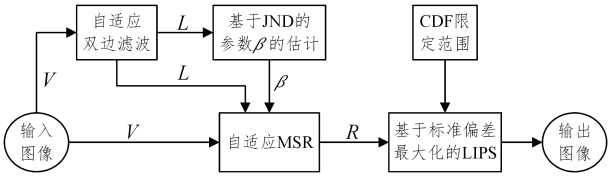


图 1 算法框架

Fig. 1 Framework of the algorithm

在实验结果分析章节中，基于多幅低照度彩色图像对本文算法及其他算法进行实验测试与对比分析，不仅在主观视觉上进行评判，还利用自然图像质量评估参数(NIQE)来对各种算法得到的增强图像的自然度进行对比。实验结果显示，本文算法在主观评价和客观评价上都优于对比算法。

2 相关工作

2.1 Retinex 理论

根据 Land 提出的 Retinex 模型[5]，原始图像可被看作是由反射分量和光照分量组成，两者之间为乘积关系，数学表达式为：

$$S(x,y)=R(x,y)\cdot L(x,y) \tag{1}$$

其中，$R(x,y)$代表反射分量，它代表的是物体的反射性质，其特性取决于物体的本质属性；$L(x,y)$表示照度分量，表现为频域中的低频分量，在一般的基于 Retinex 模型的增强算法中，都假设为高斯滤波器平滑后的结果。传统的 Retinex 图像增强算法都是将光照分量从原始图像中去除，只保留代表物体本质属性的反射分量作为增强结果。其中最具代表性的算法有单尺度 Retinex(SSR)[6]与多尺度 Retinex(MSR)[7]。为了简便运算，也为了更好地压缩动态范围，求解时需要将式(1)转换到对数域[6]：

$$\log(R(x,y))=\log(S(x,y))-\log(S(x,y)\cdot F(x,y)) \tag{2}$$

其中，$*$ 表示卷积，$F(x,y)$就是中心环绕函数，一般取高斯函数。

MSR 是由 SSR 发展而来，因为 SSR 在动态范围压缩、细节保持、色彩保真度以及边缘锐化上无法同时获得最佳效果，所以采取多尺度的方法，以获得各个尺度的优点。其数学表达式为[7]：

$$\log(R(x,y))=\sum_{n=1}^{N}w_n\cdot\{\log(S(x,y))-\log(s(x,y)*F_n(x,y)\} \tag{3}$$

由式(2)和式(3)可知，Retinex 理论最重要的部分就是估计图像的光照分量，如果想得到理想的增强结果，照度分量的估计至关重要。目前常用的照度估计方法是平滑操作，除此以外，还有变分法以及偏微分法。

2.2 LIP 模型

在图像处理领域，常用的数学和几何操作都是传统的线性操作。线性操作的缺点在于，当两幅图像进行线性操作后，图像的灰度值就会超出某一限度，从而导致数值超出界限的问题。如果灰度超过范围，则必然会导致过度增强和细节丢失。文献[12]报道了一种新的图像处理模型，模型的名称为对数图像处理模型，模型中重新定义了加法、减法、乘法以及标量乘法。LIP 模型自提出之后，便被广泛运用于图像领域，比如边缘检测[13]、图像增强[14]以及 3D 重建分析等。目前已经证明，在该模型之下执行图像灰度运算不会引起数值溢出之类的问题。

LIP 模型采用灰度色调函数来表示图像的强度，其物理意义是：当光线通过一个光强滤波器后，形成进入人眼的透射光再成像，本质上就是把原图像转换成对应的吸收滤波函数来表示，该吸收滤波函数就被定义为灰度色调函数。灰度色调函数的表达式为：

$$f(x,y)=M-f'(x,y) \tag{4}$$

其中,$f'(x,y)$是原始图像的灰度值;$f(x,y)$为灰度色调函数;M 为图像灰度的最大值,通常 8 比特的数字图像取 256。

LIP 模型的部分重要运算定义如下[15]。

加法运算:

$$f_1 \oplus f_2 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2}{M} \tag{5}$$

减法运算:

$$f_1 \ominus f_2 = M \frac{f_1 - f_2}{M - f_2} \tag{6}$$

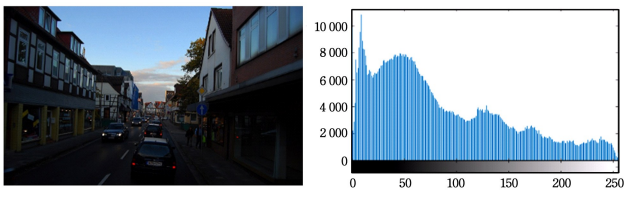
标量乘法运算:

$$\alpha \otimes f_1 = M - M\left(1 - \frac{f_1}{M}\right)^{\alpha} \tag{7}$$

其中,f_1 与 f_2 为参加运算图像的灰度色调函数,$\oplus$,$\ominus$,$\otimes$分别是对数加、减及标量乘法,α 为大于 0 的常数。当 α 小于 1 时,可以将灰度值放大;当 α 大于 1 时,可以将灰度值缩小。

3　基于 Retinex 的低照度图像增强算法

本文针对一些对比度较大的低照度图像提出了一种图像增强算法。夜间拍摄的图像因为受灯光的影响,灯光周围的区域会非常亮,而那些灯光之外的区域会非常暗,从而形成了高对比度图像。白天拍摄到的背光图片也是如此,受天空和太阳光照的影响,会形成高对比度的图像。此类图像的像素分布不仅仅集中于低光照区域,在高强度区域的占比也很高,这类图像通常在增强的过程中会发生图像暗区域增强不足以及高亮度区域过度增强的情况。图 2 显示了高对比度图像的直方图特征。观察图 2(b)可以发现,像素主要集中在低照度区域,但在亮区域也分布着很大一部分像素,如果直接对这幅图像进行均匀增强,势必会造成过度增强。为了避免这一问题,文中提出了一种用于防止高亮度区域过度增强的低光照图像增强的新方法。该方法分为两个部分:第一阶段是通过基于加权的最小可觉差的 MSR 获得反射层;第二阶段是将自适应对数图像处理减法作用在反射层上,以增强图像的对比度。这种方法在第一阶段可以有效压缩图像的动态范围,保持图像的自然性;而第二阶段在第一阶段的基础之上,自适应地控制图像的增强幅度,并利用标准偏差最大化得到最佳的增强图像。



(a)低照度图像　　(b)低照度图像直方图

图 2　高对比度低照度图像及其直方图

Fig. 2　High contrast low light image and its histogram

3.1　基于 JND 加权的多尺度 Retinex

为了保留图像的自然度并压缩图像的动态范围,本文设置一个控制因子来自适应地去除照明分量。根据 MSR 理论得到反射分量为:

$$r(x,y) = \sum_{n=1}^{N} w_n \cdot \{\lg[V(x,y)] - \beta \cdot \lg[L(x,y)]\} \tag{8}$$

其中,r 是照明自适应后的反射强度,V 是 HSV 颜色空间的通道,β 是基于 JND 阈值的控制因子。

大多数经典的 MSR 增强算法都是高斯函数和原始图像之间执行卷积得到低频图像以获得照明层,但是高斯平滑这种方式经常会导致光晕和细节丢失。在文献[16]的报道中,自适应滤波器可以通过改变滤波器的形状来对图像进行自适应滤波以减轻传统高斯滤波产生的光晕现象。Meylan[16] 和 Xu[17] 等使用 canny 边缘检测算子来定位高对比度边缘。高斯平滑函数的因子定义为:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_1, & \text{a high contrast edge was acrossed} \\ \sigma_0, & \text{no high contrast edge was acrossed} \end{cases} \tag{9}$$

Tomasi 等[18]的研究表明双边滤波器对边缘保持有明显的效果。通过添加由强度值定义的系数,该双边滤波器的边缘保持效果比高斯滤波器的边缘保持效果更佳。受其启发,为了准确估计照度并减轻光晕现象,本文采用自适应双边滤波代替高斯滤波。

$$L_n(x,y) = \frac{\sum_{x,y} V(x,y) W_n(i,j,x,y)}{\sum_{x,y} W_n(k,l,x,y)} \tag{10}$$

$$W_n(i,j,x,y) = \mathrm{e}^{-\frac{(i-x)^2+(j-y)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|V(i,j)-V(x,y)\|^2}{2\sigma_r^2}} \tag{11}$$

其中,$W_n(i,j,x,y)$是邻域中心(x,y)与附近点(i,j)之间的几何距离,σ_d 为由像素距离定义系数的控制因子,σ_r 为由像素强度值定义系数的控制因子。若两个像素之间的差大于阈值,就将因子 σ_r 设为 σ_1,否则设为 σ_0。

根据 MSR 理论,可以用式(1)来压缩动态范围。因子 β 越小,与原始图像越相似,动态范围压缩得越少;因子 β 越大,高频部分越突出,细节就越明显,动态范围也压缩得越多。

Barten 等[19]的研究通过人眼感知发现了实际亮度与背景亮度之间的关系。随后,Jayant 等提出了一种关于感知编码的关键概念,称为 JND[20]。如果图像中的两个亮度值之间的差异低于 JND 值,则差异不可察觉。基于 Retinex 的亮度自适应对比度增强算法[17]采用 JND 对照度分量进行自适应加权,并获得了良好的效果。由文献[20]可知,可见度与背景亮度之间的关系为:

$$T_l(x,y) = \begin{cases} 17 \times \left(1 - \sqrt{\frac{L(x,y)}{127}}\right) + 3, & L(x,y) \leqslant 127 \\ \frac{3}{128} \times (L(x,y) - 127) + 3, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{12}$$

其中,$L(x,y)$代表低照度图像的背景照度,在本文中,$L(x,y)$是 $L_n(x,y)$ $(n=1,2,3)$的均值;T_l 是可视化阈值,也就是 JND 值。基于 Retinex 的亮度自适应对比度增强算法[17]采用 JND 进行亮度自适应,并获得了良好的效果。可见度与背景亮度之间的关系[17]为:

$$w_1 = 1 - \frac{T_l(x,y) - \min(T_l(x,y))}{\max(T_l(x,y)) - \min(T_l(x,y))} \tag{13}$$

$$w_2 = k \cdot \mathrm{e}^{-\frac{l^2(x,y)}{\sigma_b^2}} \tag{14}$$

$$\beta = w_1 \cdot w_2 \tag{15}$$

其中,w_2 是 w_1 的控制因子,$l(x,y)$是输入图像的背景照度,σ_b 和 k 是常量。

3.2　基于 LIPS 的对比度增强

本文利用有效的对比度增强方法来增强其对比度。该算法来源于文献[15],其中对比度增强模型为对数图像处理减

法模型，如式(16)所示：

$$E'=R\ominus C=\frac{R'-C}{1-\frac{C}{M}} \tag{16}$$

其中，M 为常数，通常为 256；R 为图像的反射分量；C 是增强参数；E'，R' 分别是增强图像和反射图像的反转图像。

为了避免图像的过度增强，参数 C 需要控制在一定的范围内，本文利用反射图像的直方图信息来将 C 限定在某一区域内。首先计算图像的累积分布直方图(CDF)；然后设置一个误差参数 e，不考虑灰度值高于$(1-e)$像素的情况，得到此时累积分布函数在 0～$(1-e)$区域内的最大灰度值 T；最后就可以得到增强参数 C 的区间为$[0,255-T]$。

C 是一个取值范围为$[0,255-T]$的参数。为了寻找最佳的增强参数，该算法通过直方图标准偏差最大化，找出增强结果的直方图标准偏差最大的图像作为最终的增强结果。

4 实验结果分析

本节给出了 3 种增强方法产生的实验结果，包括经典的多尺度 Retinex[7]、基于 Retinex 的感知对比度增强[17]，以及本文提出的方法。

所有方法均在 45 张低照度图像上进行测试，测试样本和本文方法得到的增强结果分别如图 3、图 4 所示。

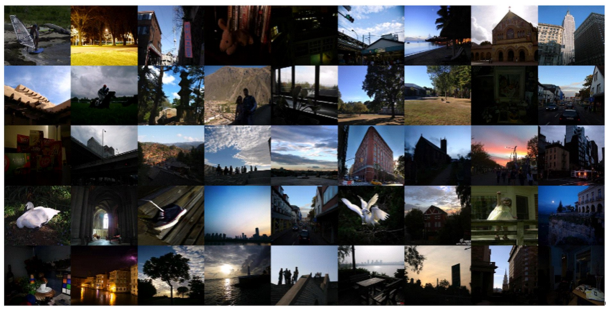


图 3 45 张低照度图像

Fig. 3 45 low light images

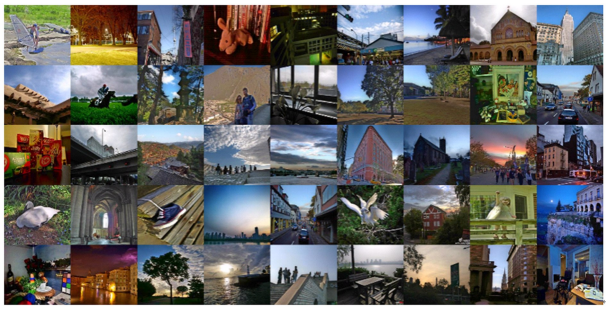
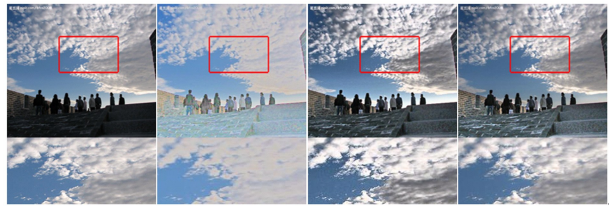


图 4 45 张图像增强效果图

Fig. 4 45 enhanced images

4.1 主观评价

本文算法和选取的对比算法的增强效果如图 5－图 8 所示，可以看出，文中所提出的方法可以自适应地控制不同区域的对比度增强程度，以防止高对比度图像上的亮区域过度增强。图 5 是一幅傍晚的图像，台阶的区域在原图中并不清楚，但是天空区域却很亮，因此在增强的过程中需要对暗区域进行增强，而天空区域需要保留。在图 5(b)中，由 MSR 增强的图像就像给整幅原图蒙上了一层雾，且天空中的云也失去了原有的信息。图 5(c)中暗区域增强了，但天空区域出现了过度增强的现象。而图 5(d)中，本文算法在增强暗区域的同时，亮区域与原图最相似，没有发生过度增强。观察图 6、图 7 的缩放区域，MSR 和 RPCE 都存在过度增强的现象，而本文算法对那些原图本不用增强的部分保持得最好，且暗区域增强后的噪声也较少。图 8(c)和图 8(d)都很好地保留了亮区域的细节，观察图像中天空区域的放大图，两者都与原图接近。观察房屋外墙的放大图，图 8(c)中的墙被蒙上了一层黑雾，原墙上的纹理被掩盖；而图 8(d)则比较自然。这是因为本文算法的第一阶段加入了一个控制函数对 JND 参数进行了微调。从图 5—图 8 可以看出，本文的算法在主观视觉方面优于其他对比算法。



(a)原图 (b)MSR[7] (c)RPCE[17] (d)本文算法

图 5 天空原图及由本文算法、MSR 和 RPCE 算法增强的天空图像

Fig. 5 Original sky image and enhancedsky images by proposed algorithm, MSR and RPCE algorithms

(a)原图 (b)MSR[7] (c)RPCE[17] (d)本文算法

图 6 山景原图及由本文算法、MSR 和 RPCE 算法增强的山景图像

Fig. 6 Original mountain image and enhanced mountain images by proposed algorithm, MSR and RPCE algorithms

(a)原图 (b)MSR[7] (c)RPCE[17] (d)本文算法

图 7 大海原图及由本文算法、MSR 和 RPCE 算法增强的大海图像

Fig. 7 Original sea image and enhanced sea images by propose algorithm, MSR and RPCE algorithms

(a)原图 (b)MSR[7] (c)RPCE[17] (d)本文算法

图 8 街景原图及由本文算法、MSR 和 RPCE 算法增强的街景图像

Fig. 8 Original street image and enhanced street images by proposed algorithm, MSR and RPCE algorithms

4.2　客观评价

客观评估总可用来解释图像的一些重要特征。根据文献[21]，本文使用自然图像质量评估参数(NIQE)的盲图像质量评估来评估增强结果，*NIQE* 值越小表示图像质量越高。表 1 列举了主观评价中 4 张参考图的 *NIQE* 结果。表 2 给出了通过上述 3 种方法增强的所有 45 幅图像的平均 *NIQE* 值。结果显示，本文算法具有比其他方法更低的 *NIQE* 值。

表 1　4.1 节中 4 幅参考图像的 *NIQE* 值

Table 1　*NIQE* value of the 4 images in 4.1 section

图像	MSR[7]	RPCE[17]	Ours
Sky	3.7755	**3.0844**	3.2077
Mountain	2.3467	2.0382	**1.9599**
Sea	3.8469	3.0067	**2.8450**
Street	**3.8667**	4.3419	4.1204

表 2　45 幅图像的平均性能比较

Table 2　Average performance comparison of 45 images

算法	NIQE
MSR[7]	3.3598
RPCE[17]	3.2183
Ours	**3.2006**

结束语　本文介绍了一种对比度较大的低光照图像增强算法。该算法在传统的多尺度 Retinex 基础之上，给图像的照明层加上了一个自适应因子来控制照度分量的去除，不仅可以保留图像的自然度，而且很好地将图像的直方图控制在了某一集中的区域内，避免了对比度增强过程中的过度增强现象。此外，对于对比度增强部分，该算法采用了基于直方图最大标准偏差的自适应 LIPS，利用直方图的累积分布直方图，算法自适应地将参数控制在某一区域内，有效保持了亮区域中的细节。实验结果表明，该方法可以获得更好的图像质量，同时有效保留图像的细节。本文方法针对的是部分对比度较大的低光照图像，在接下来的工作中，将重点研究适用于更多特征的低光照图像，并将图像算法拓展到低光照视频增强的研究中。

参 考 文 献

[1] KAUR M, VERMA K. A Novel Hybrid Technique for Low Exposure Image Enhancement using Sub-image Histogram Equalization and Artificial Neural Network[C]// International Conference on Inventive Computation Technologies. IEEE, 2017: 1-5.

[2] WANG S, ZHENG J, HU H, et al. Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-uniform Illumination Images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(9): 3538-3548.

[3] LI L, WANG R, WANG W, et al. A Low-light Image Enhancement Method for Both Denoising and Contrast Enlarging [C]// 2015 IEEE International Conference on Image Processing. Quebec City, Canada, 2015: 3730-3734.

[4] PANETTA K A, WHARTON E J, AGAIAI S S, et al. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2008, 38(1): 174-188.

[5] LAND EH, The Retinex [J]. American Scientist, 1964, 52(2): 247-264.

[6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A, et al. Properties and Performance of a Center/surround Retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.

[7] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODELL G A, et al. Multi-scale Retinex for Color Image Enhancement [C]// Proceedings of 3rd International Conference on Image Processing. Lausanne, Switzerland, 1996: 1003-1006.

[8] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A, et al. 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.

[9] KIMMEL R, ELAD M, SHAKED D, et al. A Variational Framework for Retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.

[10] NG MK, WANG W. A Total Variation Model for Retinex [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2011, 4(1): 345-365.

[11] FU X, ZENG D. A Weighted Variational Model for Simultaneous Reflectance and Illumination Estimation [C]// Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA, 2016: 2782-2790.

[12] JOURLIN M, PINOLI J C. A Model for Logarithmic Image Processing [J]. Journal of Microscopy, 1988, 149: 21-35.

[13] JOURLIN M, PINOLI J C, ZEBOUD R, et al. Contrast Definition and Contour Detection for Logarithmic Images [J]. Journal of Microscopy, 1989, 156(1): 33-40.

[14] ZHAO Z, ZHOU Y. Comparative Study of Logarithmic Image Processing Models for Medical Image Enhancement [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Budapest, Hungary, 2016: 001046-001050.

[15] HAWKES PW. Logarithmic Image Processing: Theory and Applications[M]. Academic Press, 2016: 1-259.

[16] MEYLAN L, SUSSTRUN S. High Dynamic Range Image Rendering with A Retinex-based Adaptive Filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820-2830

[17] XU K, JUNG C. Retinex-based Perceptual Contrast Enhancement in Images using Luminance Adaptation [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New Orleans, LA, USA, 2017: 1363-1367.

[18] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral Filtering for Gray and Color Images [C]// Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision. Bombay, India, 1998: 839-846.

[19] BARTEN P G J. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality [M]. WA: SPIE Press, 1999.

[20] JAYANT N. Signal Compression: Technology Targets and Research Directions [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 10(5): 796-818.

[21] MITTAL A. SOUNDARARAJAN R, BOVIK AC, et al. Making a "Completely Blind" Image Quality Analyzer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209-212.