



DOI: 10.12086/oe.2019.180439

细节保持的非均匀光照图像 亮度均衡算法

席佳祺¹, 陈晓冬^{1*}, 汪毅¹, 蔡怀宇¹,
孙刚², 杨云生²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²中国人民解放军总医院, 北京 100000

摘要: 针对目前图像增强算法应对非均匀光照环境的局限性, 提出了一种同时保持低照度区域和正常照度区域细节信息的图像亮度均衡算法。算法利用像素相邻频率和位置关系生成光照滤波器, 有效分离图像光照信息和反射细节信息。通过光照阈值划分光照亮暗区域进行低照度亮度补偿, 从而均衡图像亮度。实验结果显示, 相对于经典 NPEA 算法, 图像平均峰值信噪比提升 15.4%、平均增强度提升 245.0%、平均亮度阶差下降 25.4%。因此, 本文算法能够在保持不同照度区域的细节信息的同时均衡亮度, 获得较好的视觉效果。

关键词: 图像增强; 亮度均衡; 非均匀光照; 细节保持

中图分类号: TP391; TB872

文献标志码: A

引用格式: 席佳祺, 陈晓冬, 汪毅, 等. 细节保持的非均匀光照图像亮度均衡算法[J]. 光电工程, 2019, 46(4): 180439



Details preserved brightness equalization algorithm for non-uniform illumination images

Xi Jiaqi¹, Chen Xiaodong^{1*}, Wang Yi¹, Cai Huaiyu¹, Sun Gang², Yang Yunsheng²

¹Key Laboratory of Photoelectric Information, Ministry of Education, School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Chinese PLA General Hospital, Beijing 100000, China

Abstract: In order to overcome the limitation of current image enhancement algorithms for non-uniform illumination images, a brightness equalization algorithm is proposed to preserve the detail information in low illumination region and normal illumination region at the same time. The algorithm uses the adjacent frequency and position of pixels to generate illumination filter, so it can effectively separate illumination information and reflection information with details. The illumination threshold is used to divide different illumination areas to compensate for low illumination brightness, so as to balance the image brightness. The experimental results show that compared with the classical naturalness preserved enhancement algorithm (NPEA), the average peak signal to noise ratio of the image increases by 15.4%, the average enhancement degree increases by 245.0%, and the average brightness step difference decreases by 25.4%. The results of the proposed algorithm can maintain the details of different illumination areas while balancing the brightness and obtain a better visual effect.

收稿日期: 2018-08-21; 收到修改稿日期: 2018-10-17

基金项目: 总后重点研究计划资助项目(BWS13C028)

作者简介: 席佳祺(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电成像与检测技术的研究。E-mail: xijiaqi@tju.edu.cn

通信作者: 陈晓冬(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事光电成像与检测技术的研究。E-mail: xdchen@tju.edu.cn

Keywords: image enhancement; brightness equalization; non-uniform illumination; detail preserved

Citation: Xi J Q, Chen X D, Wang Y, *et al.* Details preserved brightness equalization algorithm for non-uniform illumination images[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 180439

1 引言

数字成像广泛应用于医疗、监控、机器视觉等领域。由于图像采集过程中光源有限,采集到的图像可能出现光照不均匀的现象。具体表现为图像局部灰度值偏低,黑暗区域信息量少,且图像视觉效果差,影响后续对图像特征判断。为了抑制非均匀光照的影响,研究人员提出许多图像增强算法。其中,被广泛使用的算法有直方图均衡化及其改进算法^[1-6]、分区色调映射算法^[7-10]、基于 Retinex 理论^[11-15]的图像增强算法等。直方图均衡化算法及其改进算法侧重于针对对比度增强而非照明均衡,对于照明条件的增强不足。分区色调映射算法将图像进行分区,根据区域亮度属性进行对数色调映射以压缩图像动态范围。此类算法对于局部亮度的均衡能够取得较好的结果,但经常需要后续处理来恢复图像细节。基于 Retinex 理论的算法将图像分解为反射和光照,将对于亮度的调整作用于不包含图像细节的光照中,因此对于保持图像细节信息占有优势。

Lin 等^[13]提出了用于低照度图像增强的多尺度 Retinex 改进方法(multi-scale Retinex improvement for nighttime image enhancement, MSRNIE),用 Sigmoid 函数代替了经典多尺度 Retinex 算法中的对数函数以压缩像素,从而避免直接剪切环境信息,在实现动态范围压缩和保持颜色恒定方面皆能取得较好成果,但其对图像亮度顺序的改变造成了图像自然度的下降。You 等^[6]提出了基于对数映射的自适应直方图均衡化方法(logarithmic mapping histogram equalization, LMHE),保持原始直方图形状特征的同时有效增强了对比度。但其侧重于针对对比度增强,对于光照条件的增强不足。Wang 等^[15]提出能够保持自然度的非均匀照明图像增强方法(naturalness preserved enhancement algorithm, NPEA)。该算法基于相邻像素对中心像素的影响与两像素值在整个图像上是相邻的频率正相关的思想提取图像光照,并将反射率控制在正常范围。但对于明暗区域面积差异大的光照不均匀图像,易在明暗交界区域造成图像失真。

本文提出一种针对非均匀光照图像的亮度均衡算法。为了均衡光照的同时保持图像细节,算法将图像

分解成不同的特征空间进行处理。利用像素相邻频率和位置关系生成光照滤波器,有效分离图像光照信息和反射细节信息。为了抑制不均匀光照,通过光照阈值将光照信息分解成亮、暗区域进行低照度区域的亮度补偿,从而均衡图像亮度。实验结果表明,算法能够在光照不均匀的图像上取得较好的增强效果。

2 设计思路

根据 Retinex 理论,图像中任一点的灰度值可由环境光照和反射率的乘积决定。光照在空间上变化较缓慢,以低频成分为主;反射率取决于物体的本身,反映物体表面颜色和细节边缘等特性,包含较多高频成分。本文利用像素相邻频率和位置关系设计光照滤波器,对图像光照进行估计,分解光照与反射信息。其次利用设计的光照补偿器对以低频成分为主的光照信息进行处理。光照补偿器通过划分亮暗区域实现对低照度区域进行亮度补偿、调整整体照度的功能。最后合成反射与补偿后的光照,得到细节保持的增强图像。算法流程如图 1 所示。

下面分别介绍光照滤波器的设计、光照估计、光照补偿器的设计等算法细节。

2.1 光照滤波器的设计

多数中心环绕的 Retinex 算法使用高斯滤波器或双边滤波器来估计光照^[13-14,16],常常出现反射计算值比光照估计值大的不合理情况。这意味着物体表面反射的光多于接收的光,反射率大于 1。Wang 等^[15]提出只考虑比中心像素更亮的相邻像素的思想以控制反射率,同时利用与像素相邻的频率相关的滤波器进行光照估计。但由于像素相邻的频率由图像灰度值的相邻关系统计得到,受图像本身影响较大,对于明暗区域面积差异大的图像,易在明暗交界区域造成图像失真。因此,本文将像素相邻频率的思想与传统高斯滤波器相融合,设计了适于非均匀光照条件的光照滤波器。

光照滤波器的基本思想为:图像中任意邻域像素(值为 b)对中心像素(值为 a)的影响,不仅与其距离中心像素的距离相关,同时与值为 a 的像素和值为 b 的像素在图像上为相邻关系的频率相关。

对于图像的亮度值 L 给出 N_a 用于判断中心像素,

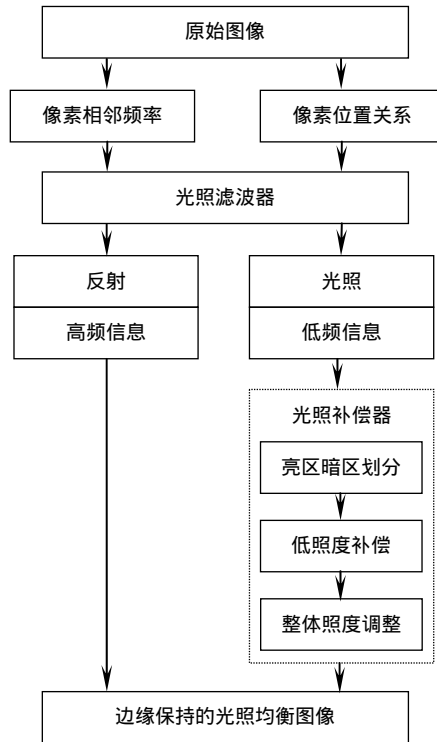


图 1 增强算法框架

Fig. 1 Proposed image enhancement framework

N_b 用于判断邻域像素, 如式(1)、式(2):

$$N_a(x, y) = \begin{cases} 1, & L(x, y) = a \\ 0, & L(x, y) \neq a \end{cases}, \quad (1)$$

$$N_b(x, y) = \begin{cases} 1, & L(x, y) = b \\ 0, & L(x, y) \neq b \end{cases}, \quad (2)$$

给出 N_{ab} 表示值为 a 的点 (x, y) 的邻域中值为 b 点的个数, 如式(3):

$$N_{ab}(x, y) = N_a(x, y) [\sum_{(i,j) \in \Omega} N_b(i, j)], \quad (3)$$

其中: Ω 为点 (x, y) 的八邻域。

给出 $N(a, b)$ 表示图像中值为 a 的点邻域中值为 b 的点的个数之和, 并以此作为值为 a 与值为 b 的像素位置关系为相邻关系的频率, 如式(4):

$$N(a, b) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n N_{ab}(x, y), \quad (4)$$

其中: m 和 n 为图像的高度和宽度。

由于 N 具有离散性, 为抑制噪声干扰, 利用其局部均值代替原值, 如式(5):

$$N'(a, b) = \frac{1}{(2 \cdot w_{in} + 1)} \sum_{i=b-w_{in}}^{b+w_{in}} N(a, i), \quad (5)$$

其中: w_{in} 为局部均值窗口大小。为估计图像窗口大小对光照图像噪声的影响, 统计多个测试图像在不同窗口下的噪声点个数, 图 2 中折线为三组测试图像得

到的数据结果, 实验结果表明, 将 w_{in} 设置为 3 能够达到良好的噪声抑制效果。

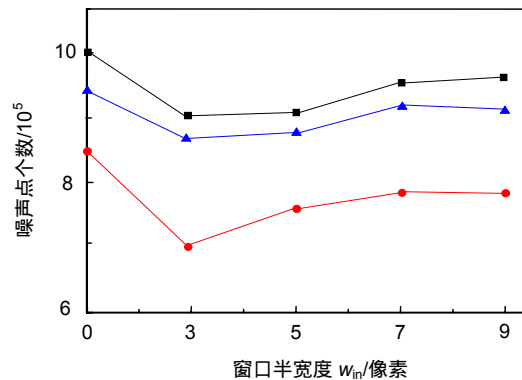


图 2 窗口半宽度 w_{in} -噪声点折线图

Fig. 2 Line chart of w_{in} -noise point

在高斯滤波器式(6)的基础上加入频率 N' 作为权重的一部分, 同时加入判断函数 U 用于筛选亮度高于中心像素的点, 光照滤波器 F_L 如式(7)。

$$H(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$F_L(L(x, y)) = \frac{1}{W(x, y)} \sum_{(i,j) \in \Phi} [N'(L(x, y), L(i, j)) + 1] \cdot H(x-i, y-j) \cdot U(L(i, j), L(x, y)) \cdot L(i, j), \quad (7)$$

$$W(x, y) = \sum_{(i,j) \in \Phi} [(N'(L(x, y), L(i, j)) + 1) \cdot H(x - i, y - j) \cdot U(L(i, j), L(x, y))] \quad (8)$$

$$U(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq y \\ 0, & x < y \end{cases} \quad (9)$$

其中： $W(x, y)$ 用于归一化，保证像素权重之和为1。 Φ 为以 $L(x, y)$ 为中心的模板覆盖区域。函数 U 用于筛选亮度高于中心像素的点，使光照估计值大于图像亮度，以达到将反射率控制在 $[0,1]$ 范围的目的。高斯函数 H 为靠近中心的像素赋予高权重，远离中心的像素赋予低权重，对图像起到平滑作用，即尽量将边缘细节信息保留在不进行后续处理的反射分量中。由于像素之间梯度与相邻频率负相关，频率 N' 对于弱化光照图像高频部分对中心像素的影响具有一定的贡献作用。同时使用 $N'+1$ 代替 N' ，避免因频率为0引入图像空洞。

2.2 光照估计

根据物体的反射率小于1的特点可知，图像光照应不小于各颜色通道中最大亮度。利用图像RGB三个颜色通道中的最大值进行光照的粗略评估。如式(10)， $I^c(x, y)$ 为 c 颜色通道亮度。

$$L(x, y) = \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x, y) \quad (10)$$

其次，利用设计的光照滤波器进行光照估计值的细化。

$$L_r(x, y) = F'_L(L(x, y)) \quad (11)$$

由式(11)可知， U 具有二值性，存在 $L(x, y)$ 为 Φ 区域亮度最大值的情况，使 Φ 区域内任意 U 为零，进而产生错误估计。为此，对光照滤波器进行修正，对于亮度为模板覆盖区域最大值的像素，以其粗略亮度估计代替光照估计值：

$$L_r(x, y) = F'_L(L(x, y)) = \begin{cases} F_L(L(x, y)), & L(x, y) \neq \max_{(i,j) \in \Phi} L(i, j) \\ L(x, y), & L(x, y) = \max_{(i,j) \in \Phi} L(i, j) \end{cases} \quad (12)$$

根据Retinex理论，反射信息可由原始图像与光照估计值得出：

$$R^c(x, y) = \frac{I^c(x, y)}{L_r(x, y)} \quad (13)$$

其中： $I^c(x, y)$ 为原始图像颜色通道 c 的亮度， $R^c(x, y)$ 为该通道对应的反射分量。

2.3 光照补偿器的设计

为了有效解决图像亮度不均对图像的影响，本文设计了亮度补偿器对弱光照进行补偿。由于亮度补偿的主要目标是使非均匀光照的暗区变亮，因此首先提

取光照图像的暗区。本文利用图像的平均光照作为阈值进行亮暗区域划分。而对于光照的估计并非全然的低频信息，存在亮度剧烈变化的地方，简单通过像素亮度区分亮暗两个区域可能导致补偿结果不自然。因此，以光照估计值的八邻域均值 \bar{L}_r 作为判定值，以平均光照 L_{mean} 为阈值进行划分，生成暗区判定图像 L_d 和亮区判定图像 L_b 。

$$\bar{L}_r(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{(i,j) \in \Omega} L_r(i, j) \quad (14)$$

其中 Ω 为以点 (x, y) 为中心的八邻域。

$$L_{mean} = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n L_r(x, y) \quad (15)$$

$$L_d(x, y) = \begin{cases} 1, & L_{mean} \geq \bar{L}_r(x, y) \\ 0, & L_{mean} < \bar{L}_r(x, y) \end{cases} \quad (16)$$

$$L_b(x, y) = \begin{cases} 1, & L_{mean} < \bar{L}_r(x, y) \\ 0, & L_{mean} \geq \bar{L}_r(x, y) \end{cases} \quad (17)$$

对于暗区判定图像 L_d 筛选出的暗区像素，对其进行亮度增强，其增强函数式：

$$L_e(x, y) = \left[\left(\frac{L_{mean} - \bar{L}_r(x, y)}{L_{mean}} + 1 \right) \cdot L_d(x, y) + L_b(x, y) \right] \cdot L_r(x, y) \quad (18)$$

式(18)对于暗区域低照度像素具有更高的增强效果，实现图像弱光照的补偿。考虑到存在光照整体偏暗的情况，即由平均光照 L_{mean} 判定的亮区像素仍处于弱光照环境。引入函数 $h(x)$ 对光照进行整体调整，如式(19)：

$$L'_r(x, y) = (L-1) \cdot [L_r(x, y) / (L-1)]^{1/h(x)} \quad (19)$$

$$h(x) = \alpha + \cos[\pi \cdot \bar{L}_r(x, y) / (L-1)] \quad (20)$$

其中： $L-1$ 是图像中的最大灰度级。 α 为 $[1,2]$ 范围内的常数， α 取值对于图像亮度均衡效果影响较小。式(20)中，给出函数 $h(x)$ 随图像亮度值增加而减小，且减小速度随亮度值增加而减小。函数 $h(x)$ 用于实现对弱光照环境下整体亮度的提升，同时对可能出现的高光环境进行亮度抑制。

对式(19)进行修正，使光照补偿器 L_e 同时实现对光照的暗区补偿和弱光照环境的整体调整：

$$L_e(x, y) = \left[\left(\frac{L_{mean} - \bar{L}_r(x, y)}{L_{mean}} + 1 \right) \cdot L_d(x, y) + L_b(x, y) \right] \cdot (L-1) \cdot \left(\frac{L_r(x, y)}{L-1} \right)^{1/h(x)} \quad (21)$$

根据Retinex理论，合成反射分量和均衡后的光照，以获得最终的增强图像。

$$E I^c(x, y) = R^c(x, y) \times L_c(x, y), \quad (22)$$

其中： $E I^c(x, y)$ 是颜色通道 c 的增强结果， $L_c(x, y)$ 为均衡后的光照。由于图像高频细节信息存在于反射信息 $R^c(x, y)$ 中，而对于非均匀光照的处理被施加于被分离出的光照信息上。因此，算法能够有效保持细节信息。且由于增强前后三种颜色通道亮度的比值无变化，图像色调不会产生变化，利于图像自然度的保持。

为更清晰的描述算法流程，将其伪码显示如图 3。

3 实验结果

为了验证本文算法的有效性，利用 Matlab 对算法编程实现，并将本文算法的处理结果与其他相关算法进行比较。实验过程中使用的计算机硬件配置为 Intel® Core i3-2100 CPU，4 GB 内存。

本文一共选择了八张亮度不均匀的图像进行实验，这八张图像均来自华盛顿大学图像处理图库，图像中存在细节难以识别的低照度区域。将本文算法与几种近几年光照不均图像增强方法进行比较，如 Kong 等^[19]提出的基于增强子的非均匀图像增强算法(EBCE)、王殿伟等^[10]提出的基于改进二维伽马函数自适应亮度校正算法(ACA)、Wang 等^[15]提出的自然度保持的非均匀照明图像增强方法(NPEA)，其结果显示于图 4~图 11 中。

对于图 4~图 11 所示的八张图像，与其他算法相比，本文算法能够在实现光照均衡的同时获取光照较暗区域轮廓与正常光照区域细节。如图像 1(图 4(e))中，光照较暗区域拱门内白色电线轨迹基本能够辨认，正常光照区域壁灯附近砖缝细节信息保持较好。EBCE

```

1 L=f_max(I); //取图像I三颜色通道的最大值作为光照粗略估计
2 N(a,b)=f_findab(L); //统计光照粗略估计L中值为a与值为b的像素点为相邻关系的次数
3 N'=f_mean(N); //求解局部均值
4 H(Lc, Ln)=guass(Lc, Ln); //构建高斯函数, Lc、Ln为中心像素及其邻域像素
5 U(Lc, Ln)=judge(Lc, Ln); //构建二值函数
6 LF_sum(Lc)=f_sum(N'(Lc, Ln)*H(Lc, Ln)*U(Lc, Ln)); //构建光照滤波器, 使其遍历Lc的邻域像素并求和
7 LF(Lc)=LF_sum(Lc)/w; //归一化
8 Lr=f_filter(LF, L); //光照估计
9 Rc=Ic/Lr; //分解光照、反射
10 Lr_mean=f_meanfilter(Lr); //取光照估计值的八邻域均值
11 mean=f_sum(Lr)/(m*n); //取平均光照
12 Ld=judge(mean, Lr_mean); //生成暗区判定图像和亮区判定图像
13 Lb=judge(Lr_mean, mean);
14 Lr'=Lr.^(1/h); //对弱光照环境进行整体调整
15 Le=((mean-Lr_mean)/mean+1)*Ld+Lb)*Lr'; //进行光照补偿
16 EIC=Ic*Le; //合成补偿结果和反射信息
    
```

图 3 增强算法伪码

Fig. 3 Pseudo code of image enhancement algorithm

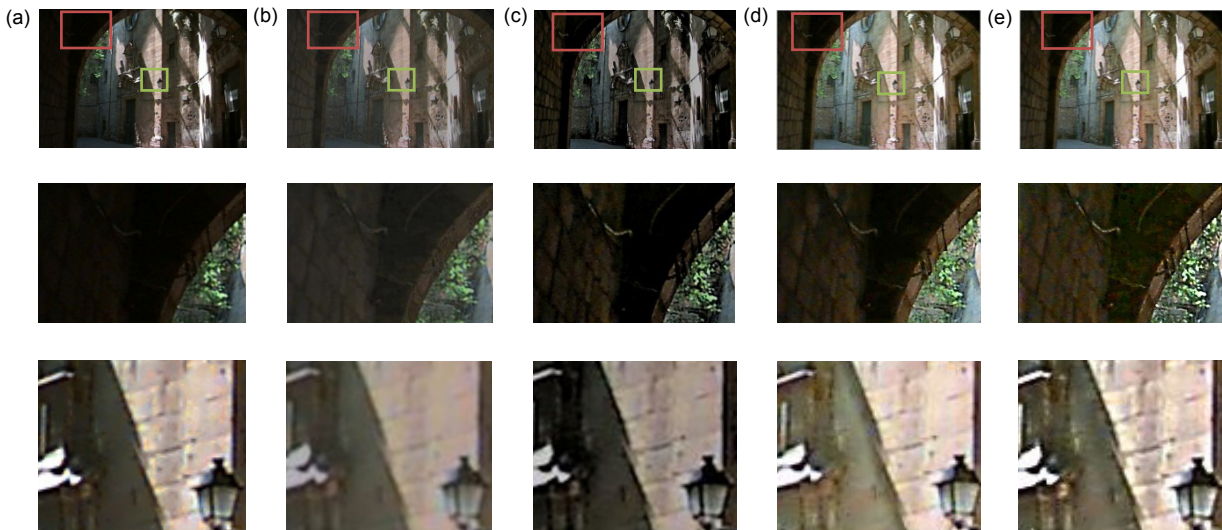


图 4 图像 1 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 4 Results for image 1. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

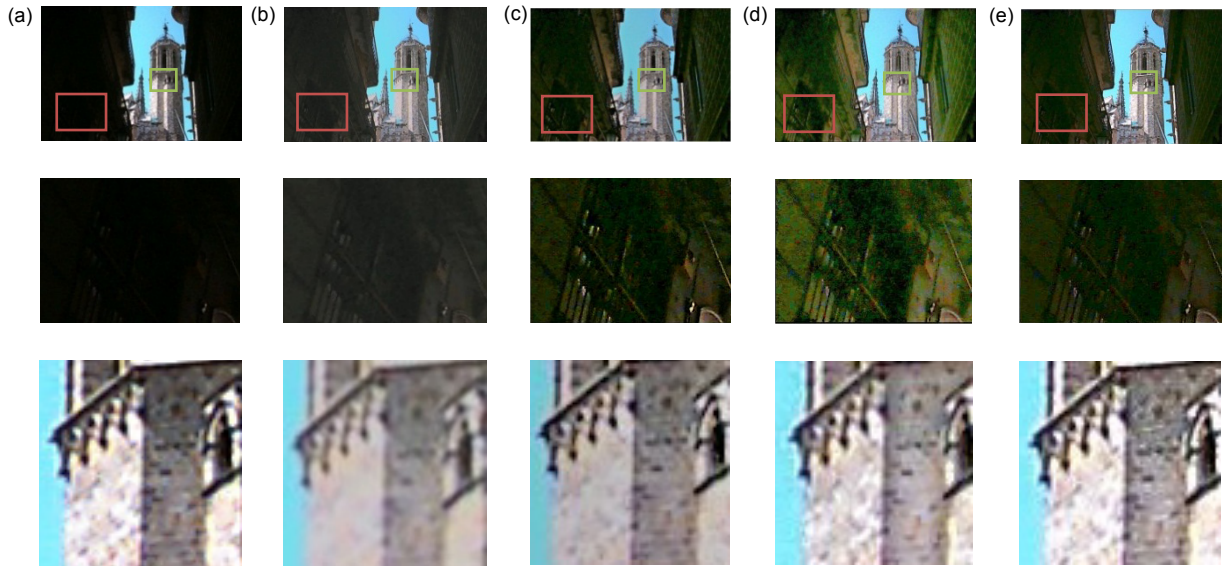


图 5 图像 2 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 5 Results for image 2. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm



图 6 图像 3 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 6 Results for image 3. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

算法对于图像整体亮度的提升占有优势,但对于图像非弱光照区域的细节信息保持处于劣势。如图 4(b)、图 5(b)中正常光照区域中的墙壁,图 8(b)中的叶片产生了纹理信息丢失的现象。ACA 算法对于低照度区域的亮度提升效果明显且能够取得较高的对比度,但对于图像正常光照区域处理效果不够理想。如图 4(c)、图 5(c)、图 10(c)中,正常光照区域中墙壁的纹理细节和亮度信息的保持效果不理想。NPEA 算法对于保持图像自然度和细节占有优势,但其对光照的双对数变

换处理使其对于弱光照区域的细节增强处于劣势,如图 4(d)中拱门内白色电线轨迹较不明显,图 9(d)、图 11(d)中墙体产生伪边缘。且对于整体亮度较低的图像,弱光照区域和亮暗边界位置易产生图像失真,如图 5(d)窗体附近区域颜色偏绿、图 7(d)光斑附近叶片模糊。相比之下,本文算法利用设计的光照滤波器估计光照,并对光照低照度区域进行补偿,能够获取更多的细节信息,实现光照均衡的同时较好地保持图像自然度。

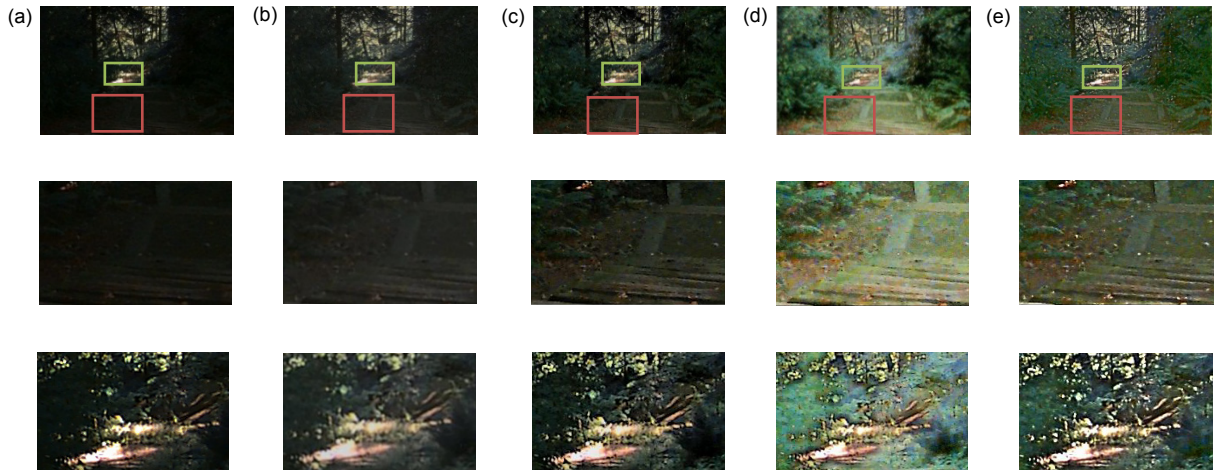


图 7 图像 4 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 7 Results for image 4. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

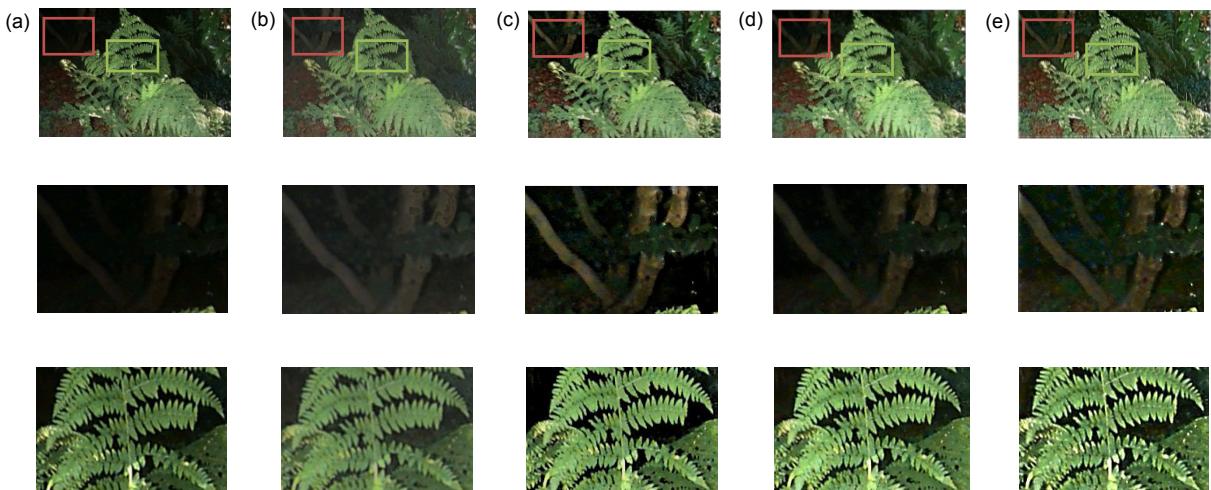


图 8 图像 5 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 8 Results for image 5. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

4 数据分析

选择熵(Entropy, E)^[17]、峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)、增强度(measure of enhancement, EME)^[18]、亮度阶差(lightness order error, LOE)^[15]四种图像评价因子进行图像信息量、增强效果、信噪比、自然度的客观评价。图像熵的大小可在一定程度上反映增强结果的信息量, 图像的熵越大, 则图像包含的信

息量越大, 细节内容越丰富。但熵的增加可能会导致噪声的增加, 因此通过峰值信噪比(PSNR)对增强图像相较于输入图像的劣化水平进行评估。峰值信噪比越高, 增强图像的质量越好。增强度(EME)将图像划分为多个子图像块, 通过各个子图像块中最大与最小强度的平均比值对图像增强的效果进行评估。增强度越高, 则增强效果越明显。为了确保增强度的增加并未引起图像亮度顺序过大的变化, 进而造成图像的

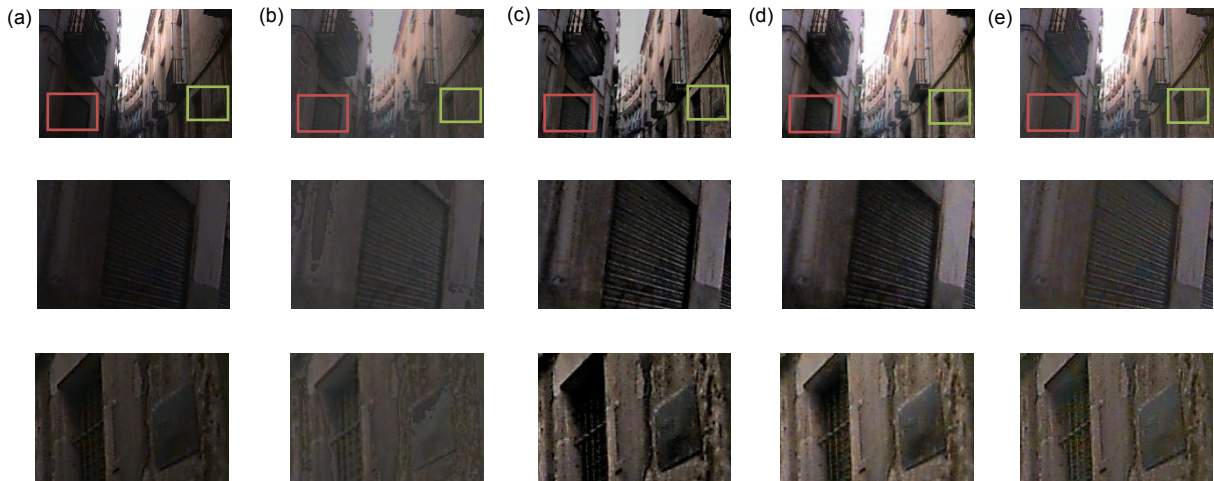


图9 图像6处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 9 Results for image 6. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

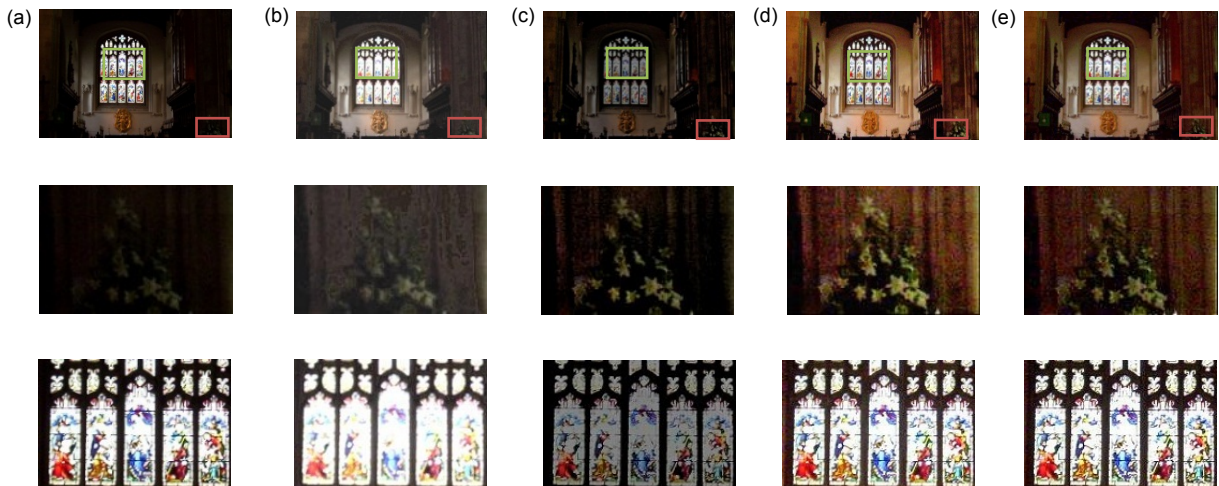


图10 图像7处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 10 Results for image 7. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

失真, 还需对亮度顺序进行统计。基于原始图像与其增强版本之间的亮度阶差(LOE)用于图像亮度顺序的测定。LOE 值越小, 增强图像与原图像亮度顺序越相似, 即自然度保持得越好。

本文选取图 4~图 11 所示的八张图像, 采用四种图像评价因子对处理结果进行评价, 评价结果如表 1~表 4 所示, 将表中最优结果以及次优结果显示为粗体。分析表中数据, EBCE 算法保持图像峰值信噪比的能力较强, 但在信息量、增强度和亮度阶差方面不占优

势。ACA 算法对于增强度的输出结果优良, 但图像信息熵结果处于劣势, 且其亮度阶差和图像峰值信噪比结果皆略弱于本文算法。本文算法处理结果的信息熵与 NPEA 算法大致相同, 但峰值信噪比、增强度和亮度阶差结果皆优于 NPEA 算法。相比之下, 本文算法的增强结果能够在图像信息量、信噪比、对比度和自然度四个方面取得较好结果, 更适于亮度不均图像的增强处理。

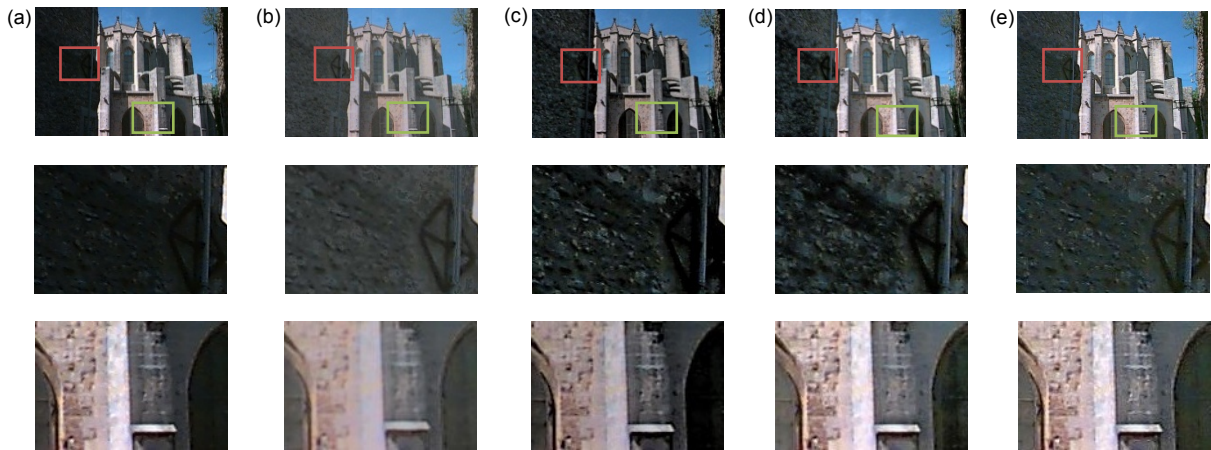


图 11 图像 8 处理结果。(a) 原图; (b) EBCE 处理结果; (c) ACA 处理结果; (d) NPEA 处理结果; (e) 本文处理结果

Fig. 11 Results for image 8. (a) Original image; (b) Enhanced image of EBCE; (c) Enhanced image of ACA; (d) Enhanced image of NPEA; (e) Enhanced image of the proposed algorithm

表 1 图像熵对比

Table 1 Performance comparison of Entropy

	EBCE	ACA	NPEA	本文方法
图像 1	6.7759	6.3986	7.3644	7.3908
图像 2	6.0986	6.2287	6.9923	6.2990
图像 3	6.1371	6.7247	7.1099	6.9896
图像 4	5.5590	6.3906	7.4197	7.1557
图像 5	6.5750	7.1734	7.0360	7.2182
图像 6	6.6759	7.1319	7.6879	7.4086
图像 7	6.0638	6.1719	6.9306	7.2879
图像 8	7.3078	7.1795	7.7850	7.4435
平均值	6.7303	7.0599	7.5043	7.5045

表 2 图像峰值信噪比对比

Table 2 Performance comparison of PSNR

	EBCE	ACA	NPEA	本文方法
图像 1	19.2995	17.7274	16.3316	17.4192
图像 2	18.3451	20.8345	15.5244	20.2428
图像 3	23.2680	20.0979	13.9212	22.1396
图像 4	22.5285	22.6555	11.1801	21.0813
图像 5	20.1844	20.5146	20.4338	25.6804
图像 6	17.5665	18.6475	15.8025	18.2134
图像 7	14.6139	19.1116	14.6980	21.9548
图像 8	18.1961	22.1573	21.7747	19.6659
平均值	16.7952	21.0702	18.8262	21.7162

表 3 图像增强度对比

Table 3 Performance comparison of EME

	EBCE	ACA	NPEA	本文方法
图像 1	29.1031	219.7958	69.5007	153.0762
图像 2	19.1917	263.9296	75.3386	226.6238
图像 3	51.7701	284.0402	93.9338	234.0508
图像 4	39.6123	301.9907	110.9626	223.9246
图像 5	42.6311	329.8859	133.8446	252.6182
图像 6	18.2955	262.0133	56.6423	107.4543
图像 7	38.6975	454.7314	97.8607	474.2258
图像 8	24.7261	320.5474	81.1888	140.6896
平均值	42.3844	414.0190	104.2645	359.7217

表 4 图像亮度阶差对比

Table 4 Performance comparison of LOE

	EBCE	ACA	NPEA	本文方法
图像 1	0.3171	0.2465	0.1974	0.2389
图像 2	0.4738	0.2735	0.3894	0.1406
图像 3	0.5337	0.2836	0.3257	0.2193
图像 4	0.5667	0.2281	0.3471	0.2120
图像 5	0.4087	0.1823	0.0812	0.1645
图像 6	0.4295	0.3687	0.2289	0.1935
图像 7	0.4691	0.4880	0.2545	0.1197
图像 8	0.3779	0.2131	0.2217	0.1785
平均值	0.4433	0.3416	0.1989	0.1484

5 结 论

本文针对图像亮度不均,局部灰度值偏低的问题,提出了一种同时保持低照度区域和正常照度区域细节信息的图像亮度均衡算法。算法利用设计的光照滤波器对图像光照进行估计,有效分解光照信息和反射高频信息。为了抑制不均匀光照,采用亮度补偿器对图像进行分区、低照度区域补偿、整体亮度调整。考虑到在图像增强过程中,图像亮度不均抑制效果与图像信息量、图像质量、增强程度和自然度保持效果密切相关,本文采用信息熵(Entropy, E)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)、增强度(measure of enhancement, EME)、亮度阶差(lightness order error, LOE)四种图像评价因子进行图像信息量、增强效果、信噪比、自然度的客观评价。实验结果表明,相对于经典

NPEA 算法,本文算法处理结果的平均峰值信噪比提升 15.4%、平均增强度提升 245.0%、平均亮度阶差下降 25.4%。因此,本算法能够在保持细节信息的同时实现光照均衡,对于亮度不均图像具有较好的适用性。

参考文献

- [1] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, **43**(1): 1-8.
- [2] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, **45**(1): 68-75.
- [3] Chen S D, Ramli A R. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, **49**(4): 1301-1309.
- [4] Tang J R, Isa N A M. Adaptive Image Enhancement based on Bi-Histogram Equalization with a clipping limit[J]. *Computers &*

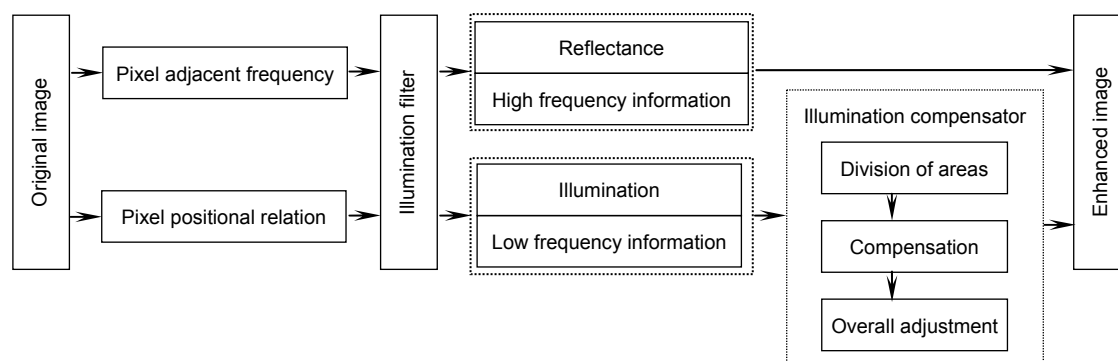
- Electrical Engineering*, 2014, **40**(8): 86–103.
- [5] Kim T, Paik J. Adaptive contrast enhancement using gain-controllable clipped histogram equalization[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, **54**(4): 1803–1810.
- [6] Kim W, You J, Jeong J. Contrast enhancement using histogram equalization based on logarithmic mapping[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6): 067002.
- [7] Lu B B, Li Y J, Zheng Y M, *et al.* A visual adaptive multi-scale logarithmic tone mapping algorithm[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, **38**(3): 625–629.
芦碧波, 李玉静, 郑艳梅, 等. 视觉自适应多尺度对数色调映射算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2017, **38**(3): 625–629.
- [8] Lu X M, Zhu X Y, Li Z W, *et al.* A brightness-scaling and detail-preserving tone mapping method for high dynamic range images[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(6): 1080–1092.
陆许明, 朱雄泳, 李智文, 等. 一种亮度可控与细节保持的高动态范围图像色调映射方法[J]. *自动化学报*, 2015, **41**(6): 1080–1092.
- [9] Li B, Zhu M, Fan Z K, *et al.* An adaptive Gamma enhancement algorithm for non-niform illumination images[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2016, **40**(3): 299–302.
李渤, 朱梅, 樊中奎, 等. 非均匀光照图像自适应 Gamma 增强算法[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2016, **40**(3): 299–302.
- [10] Wang D W, Wang J, Xu Z J, *et al.* Adaptive correction algorithm for non-uniform illumination images[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, **39**(6): 1383–1390.
王殿伟, 王晶, 许志杰, 等. 一种光照不均匀图像的自适应校正算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, **39**(6): 1383–1390.
- [11] 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.
- [12] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C]//*Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*, 1996, **3**: 1003–1006.
- [13] Lin H N, Shi Z W. Multi-scale retinex improvement for nighttime image enhancement[J]. *Optik*, 2014, **125**(24): 7143–7148.
- [14] Zhao H Y, Xiao C B, Yu J, *et al.* A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(4): 1048–1055.
赵宏宇, 肖创柏, 禹晶, 等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(4): 1048–1055.
- [15] Wang S H, Zheng J, Hu H M, *et al.* Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(9): 3538–3548.
- [16] Xiao Q, Ding X H, Wang S J, *et al.* A halo-free and hue preserving algorithm for color image enhancement[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, **22**(8): 1246–1252.
肖泉, 丁兴号, 王守觉, 等. 有效消除光晕现象和颜色保持的彩色图像增强算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, **22**(8): 1246–1252.
- [17] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, **5**: 3–55.
- [18] Agaian S S, Lentz K P, Grigoryan A M. A new measure of image enhancement[C]//*IASTED International Conference on Signal Processing & Communication*, 2000.
- [19] Kong T L, Isa N A M. Enhancer-based contrast enhancement technique for non-uniform illumination and low-contrast images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, **76**(12): 14305–14326.

Details preserved brightness equalization algorithm for non-uniform illumination images

Xi Jiaqi¹, Chen Xiaodong^{1*}, Wang Yi¹, Cai Huaiyu¹, Sun Gang², Yang Yunsheng²

¹Key Laboratory of Photoelectric Information, Ministry of Education, School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Chinese PLA General Hospital, Beijing 100000, China



Proposed image enhancement framework

Overview: Digital imaging is widely used in medical, surveillance, machine vision and other fields. Due to the limited light source during image acquisition, the captured image may have uneven illumination. The specific performance is low image local gray value, less dark area information and poor image visual effect, which affect subsequent judgment of image features.

In order to overcome the limitation of current image enhancement algorithms for non-uniform illumination images, a brightness equalization algorithm is proposed to preserve the detail information of low illumination region and normal illumination region at the same time. According to the Retinex theory, the gray value of any point in the image can be determined by the product of ambient illumination and reflectivity. Ambient illumination changes slowly with position, corresponding to the low frequency components of the image. Reflectivity depends on the object itself, reflecting the characteristics of the surface color and detail edges of the object. It contains the high frequency components of the image.

In this paper, an illumination filter for illumination estimation is designed by combining the adjacent frequency of the pixel with a conventional Gaussian filter. The basic idea of the illumination filter is that the influence of any neighborhood pixel in the image on the central pixel is not only related to the distance from the central pixel, but also related to the adjacent frequency of the values of the pixels on the image. It can effectively separate illumination information and reflection information with details. Then, the designed illumination compensator is used to process the illumination information which is mainly composed of low frequency components. The compensator uses illumination threshold to divide different illumination areas to compensate for low illumination brightness and adjust the overall illumination. The reflected and compensated illumination is combined to obtain an enhanced image with details retained.

Considering that in the process of image enhancement, the suppression effect of image brightness unevenness is closely related to the image information quantity, image quality, enhancement degree and naturalness maintenance effect, this paper uses four image evaluation factors (Entropy, PSNR, EME, and LOE) to objectively evaluate the image quality. The experimental results show that compared with the classical NPEA algorithm, the average peak signal to noise ratio of the image increases by 15.4%, the average enhancement degree increases by 245.0%, and the average brightness step difference decreases by 25.4%. The results of the proposed algorithm can maintain the details of different illumination areas while balancing the brightness, and obtain a better visual effect.

Citation: Xi J Q, Chen X D, Wang Y, *et al.* Details preserved brightness equalization algorithm for non-uniform illumination images[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 180439

Supported by Key Research Program of General Logistics Department of the Chinese People's Liberation Army (BWS13C028)

* E-mail: xdchen@tju.edu.cn