Low Light Image Enhancement Based on Multi-Scale Iterative Histogram Equalization *

ZHANG Wentao *
(School of Information Engineering, Jiangxi Modern Polytechnic College, Nanchang Jiangxi 330095, China)

Abstract: Targeting at the defects of over enhancement and noise amplification in low light image enhancement, an image enhancement method based on multi-scale iterative histogram equalization is proposed. Taking full advantage of the feature that the brightness component of the image is independent of the color component, the low light image is transformed from RGB color space to HSI color space. In view of the good edge preserving ability of bilateral filtering, based on the Retinex theory, the resultant image of bilateral filtering is used to estimate the illumination layer L of brightness component I. Multi-scale iterative histogram equalization enhancement is performed on the illumination layer L to improve the brightness and contrast of the image. Experimental results confirm that, in comparison with the latest similar methods, the proposed method obtains better visual effect, higher average gradient and information entropy, achieving better image enhancement performance.

Key words: low light image enhancement; multi-scale iterative histogram equalization; Retinex; HSI color space; bilateral filtering
EEACC: 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.011

多尺度迭代直方图均衡的低照图像增强 *

张文涛 *
(江西现代职业技术学院信息工程学院, 江西 南昌 330095)

摘 要: 针对低照图像增强后会出现过增强和放大噪声等缺陷, 提出了多尺度迭代的直方图均衡的图像增强方法。充分利用图像的亮度分量与颜色分量无关的特性, 将低照图像的颜色空间由 RGB 转换到 HSI; 鉴于双边滤波具有良好的边缘保持能力, 根据 Retinex 理论, 用双边滤波的结果图像对亮度分量 I 的光照层 L 进行估计; 在光照层上进行多尺度迭代的直方图均衡增强, 以此提升图像的亮度和对比度。实验结果证明, 相对于最新的同类方法, 所提方法增强图像后的视觉效果更佳, 平均梯度和信息熵更高, 因此所提方法的图像增强性能更优。

关键词: 低照图像增强; 多尺度迭代的直方图均衡; Retinex; HSI 颜色空间; 双边滤波
中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2009-08

由于拍摄环境的光照条件不足, 成像往往会产生低光照效果。低光照图像的对比度较低, 部分图像信息隐藏于暗处, 图像的细节信息得不到正常显示[1]。图像的处理和应用需要高质量的图像, 因此低光照图像亟需进行有效的增强。低照图像增强方法分为基于直方图处理类的图像增强[2]、基于像素重映射类的图像增强[3]和基于深度学习类的图像增强[4]。标准的直方图均衡化旨在充分利用灰度级的动态空间, 但是会合并频次较少的灰度级, 从而产生欠增强, 同时会过度拉伸频次较大的灰度级, 从而产生过增强[5]。Singh 等[6]提出平台直方图均衡化, 避免了对微小细节的欠增强和背景的过增强。为了避免在增强过程中放大噪声, Patil 等[7]提出一种结合去噪和去雾的直方图均衡化方法, 实现改善图像对比度的目的, 同时避免产生噪声。针对部分增强方法未能保留图像细节, 甚至可能降低高照度区域的局部对比度, Li 等[8]将校正函数与对比度受限的自适应直方图均衡结合, 分别进行全局增强和局部增强。但是全局增强和局部增强之间会产生互相抵消、互相抵触的效果。Mukaida 等[9]结合 RGB 颜色空间的等色调平面, 用 Gamma 变换改善低照图像的可见性, 而使用直方图规定化提升图像的对

项目来源: 国家自然科学基金项目(82274680); 江西省教育厅科学技术项目(GJJ2205124); 江西省教育科学“十三五”规划课题项目(19YB266)
收稿日期: 2024-05-20 **修改日期**: 2024-07-03

比度。

为了有效改善低照图像的亮度,部分学者提出了结合 Retinex 视觉理论和灰度映射的图像增强算法。Mayathevar 等[10] 在直方图均衡化中结合 Gamma 校正,进一步改善图像的亮度和对比度。但是直方图均衡化和 Gamma 校正的双重增强会放大背景噪声。为了在强化图像特征的同时避免产生噪声,文献[11]结合 Retinex 视觉理论,提出一种多相图像增强算法,用伽马校正的 S 形函数对光照图像进行增强并作归一化处理,实现低照图像的快速而有效的增强。陈家益等[12]将图像分解为光照图像和反射图像,对光照图像进行 Gamma 矫正,有效提升了图像的亮度和对比度。

深度学习以强大的图像特征提取能力著称,部分学者将其引入到图像增强中,但是部分基于深度学习的图像增强方法忽略了特征空间中的场景信息,导致细节丢失、颜色不饱和与伪影等。于是,Ma 等[13]提出了一种上下文敏感分解的网络体系结构,以充分利用空间尺度上的场景级上下文相关性,其中提出了一种能够感知上下文的分解链接,并对两个流机制根据物理原理进行桥接。Praveena 在文献[14]中提出了基于卷积网络的低照图像增强模型,将图像分离为红、蓝、绿三通道,并为每个通道训练单独的模型。针对部分方法需要大规模数据集和配对训练数据的不足,Khan 等[15]将低照图像拆分为光照层和反射层,对光照图像进行放大,用图像分割进一步增强图像的对比度。但是深度学习的训练和预测建模耗时较高,在实时应用上其适用性较差。

为了在改善图像的亮度分布和提升图像对比度的同时,避免过增强和噪声放大,提出多尺度迭代的直方图均衡的图像增强方法。在 HSI 颜色空间中将亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 根据 Retinex 理论分解为光照层和反射层,对光照层 $\boldsymbol{L}$ 进行多尺度迭代的直方图均衡增强处理,适宜地提升图像的亮度和对比度。质化和量化的实验结果证明,相对于最新提出的同类方法,本文方法的增强性能更优。

1 HSI 颜色空间

人眼对图像进行感知时,从色调($\boldsymbol{H}$)是否自然、饱和度($\boldsymbol{S}$)是否适宜和亮度($\boldsymbol{I}$)是否理想三个方面对图像进行分析。HSI 颜色模型将颜色特性分为色调、饱和度和亮度三部分。色调 $\boldsymbol{H}$ 表示颜色对应的频率和波长,取值范围为[0°,360°];饱和度 $\boldsymbol{S}$ 表示颜色的鲜艳程度,值的空间为[0,1];亮度 $\boldsymbol{I}$ 表示光线的明暗程度,值的空间为[0,1]。HSI 模型基于两个事实:①亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 独立于图像的颜色信息;②色调 $\boldsymbol{H}$ 和饱和度 $\boldsymbol{S}$ 与人眼感知颜色的方式是一致的。

将图像的颜色空间由 RGB 转换到 HSI 的定义为

$$\boldsymbol{H}=\begin{cases}\theta & G\geqslant B\\ 2\pi-\theta & G<B\end{cases} \tag{1}$$

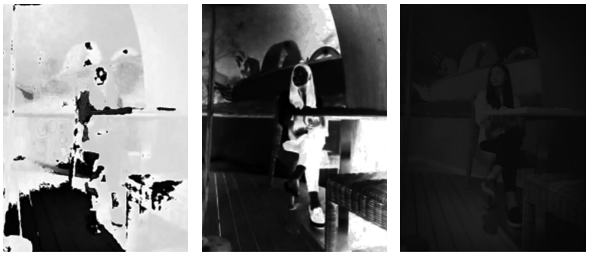
$$\boldsymbol{S}=1-\frac{3\min(R,G,B)}{R+G+B} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{I}=\frac{R+G+B}{3} \tag{3}$$

$$\theta=\arccos\frac{(R-G)+(R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}} \tag{4}$$

HSI 模型中的亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 独立于颜色信息 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{S}$,亮度与图像颜色信息互不干扰,对亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 进行增强处理,而颜色信息不受影响。对于低光照图像,只需对亮度分量进行增强,而保持颜色信息不变,即可增强图像的效果。

由 RGB 颜色空间转换到 HSI 空间的效果如图 1 所示。很明显,低照图像的主要缺陷在于亮度分量 $\boldsymbol{I}$,只需改善亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 的效果,就能有效增强低照图像。



(a) 色调 (b) 饱和度 (c) 亮度

图 1 RGB 空间转换到 HSI 空间的效果图

2 亮度 $\boldsymbol{I}$ 的 Retinex 分解

2.1 基于 Retinex 理论的图像分解

根据人类视觉对场景亮度和物体颜色的感知特性,Retinex 理论认为:①人眼视觉系统所感知的颜色,决定于光和物体的相互作用。②一定波长的红、绿和蓝三原色的组合构成多种多样的颜色。③物体表面和场景呈现的颜色,决定于物体和场景对长、中和短波光线的反射特性,具有颜色恒常性。

因此图像可以看作入射光和物体对入射光的反射特性共同作用的结果,于是根据 Retinex 理论,可将图像 $\boldsymbol{I}$ 看作为光照层 $\boldsymbol{L}$ 和反射层 $\boldsymbol{R}$ 的乘积。

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{L}\times\boldsymbol{R} \tag{5}$$

为了简化计算,根据人眼对图像像素变化的感

知近似服从对数分布的特性,将式(5)转换到对数域:

$$\ln \boldsymbol{I} = \ln \boldsymbol{L} + \ln \boldsymbol{R} \tag{6}$$

式中:光照层 $\boldsymbol{L}$ 可用图像的滤波进行估计:

$$\boldsymbol{L} = \mathrm{Filter}(\boldsymbol{I}) \tag{7}$$

对式(6)进行恒等变换,得到反射层 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R} = \exp(\ln \boldsymbol{I} - \ln \boldsymbol{L}) \tag{8}$$

对于式(7)的滤波器 Filter,因为双边滤波[16]具有良好的边缘保持能力,我们利用图像的双边滤波结果作为光照层的估计。

作为样例,对图 1(c)所示的亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 进行基于双边滤波的 Retinex 分解,效果如图 2 所示。

(a) 光照层　　(b) 反射层

图 2　Retinex 的分解效果图

2.2　双边滤波

双边滤波是一种加权均值滤波,是结合像素的空间邻近度和像素值相似度的一种自适应滤波处理,同时考虑空间域信息和像素值相似性,以实现图像去噪的同时,保持图像纹理边缘。令 $\boldsymbol{I}(i)$ 为图像 $\boldsymbol{I}$ 中的像素值,$\boldsymbol{N}_i(d)$ 为像素邻域,其中心像素为 i,大小为 $d \times d$,双边滤波的定义为:

$$\mathrm{BiFilter}[\boldsymbol{I}(i)] = \frac{\sum_{j \in N_i(d)} W_d(i,j) W_r(i,j) \boldsymbol{I}(j)}{\sum_{j \in N_i(d)} W_d(i,j) W_r(i,j)} \tag{9}$$

式中:加权系数包含两部分权值:空间域邻域度的权值和像素域相似度的权值,其定义分别为

$$W_d(i,j) = \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{2\sigma_d^2}\right) \tag{10}$$

$$W_r(i,j) = \exp\left[-\frac{|\boldsymbol{I}(i) - \boldsymbol{I}(j)|^2}{2\sigma_r^2}\right] \tag{11}$$

式中:$|i-j|$ 表示两个像素 i 和 j 的空间距离,σ_d 和 σ_r 分别为空间域和像素域的正则化参数,两者共同决定着细节和边缘的保持效果,较小与较大的值分别对应良好的边缘保持和图像平滑效果。

双边滤波的边缘保持能力,体现在其自适应的加权系数。基于空间邻近测度的权值 $\boldsymbol{W}_d(i,j)$ 反比于像素 i 和 j 之间的空间距离,距离越小,权值越大。根据式(10),每个像素 i 对应的邻域 $\boldsymbol{N}_i(d)$,其权值 $\boldsymbol{W}_d$ 的分布是一样的。基于像素值相似测度的权值 $\boldsymbol{W}_r(i,j)$,反比于像素 i 和 j 的灰度绝对差,灰度差越小,权值越大。如果邻域 $\boldsymbol{N}_i(d)$ 处于均匀区域,那么像素 $\boldsymbol{I}(j)$ 和 $\boldsymbol{I}(i)$ 的差别较小或接近于 0,权值 $\boldsymbol{W}_r(i,j)$ 接近于 1,此时定义式(9)的加权系数中 $\boldsymbol{W}_d(i,j)$ 起主导作用,图像的平滑效果较明显;如果邻域 $\boldsymbol{N}_i(d)$ 处于纹理边缘区域,那么像素 $\boldsymbol{I}(j)$ 和 $\boldsymbol{I}(i)$ 的差别较大,权值 $\boldsymbol{W}_r(i,j)$ 接近于 0,此时定义式(9)的加权系数接近于 0,即邻域像素 j 对当前像素 i 的滤波结果的影响非常小,像素 i 的滤波结果接近或等于原值 $\boldsymbol{I}(i)$,实现了纹理边缘的有效保持。因此双边滤波能够同时实现均匀区域平滑化、保持细节区域的纹理特征的双重效果。

根据图 2 所示的效果图可以看出,双边滤波在均匀区域,具有明显的平滑效果,而在细节和边缘区域,能够有效地保持图像的细节特征和连贯的边缘。

3　多尺度迭代的直方图均衡

将低照图像的颜色空间由 RGB 转换到 HSI,保持色调 $\boldsymbol{H}$ 和饱和度 $\boldsymbol{S}$ 不变,增强亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 的光照效果,即可改善图像的亮度和提升图像的对比度。根据 Retinex 理论,将亮度分量 $\boldsymbol{I}$ 拆分为光照层 $\boldsymbol{L}$ 和反射层 $\boldsymbol{R}$。根据标准的直方图均衡的原理,图像的直方图均衡会合并部分灰度级,对应频次较小和频次较大的灰度级的直方图分别被压缩和过度放大,从而产生纹理细节的欠增强和背景区域的过增强。因此,本文对光照层 $\boldsymbol{L}$ 进行多尺度迭代的直方图均衡化:①将图像 $\boldsymbol{L}$ 的直方图根据灰度级的数量等分为四个子直方图,子直方图分别进行直方图均衡化;根据均衡化的子直方图对图像 $\boldsymbol{L}$ 进行灰度映射,得到第一尺度的增强图像 $\boldsymbol{L}_1$。②将图像 $\boldsymbol{L}_1$ 的直方图根据灰度级数量等分为两个子直方图,子直方图分别进行直方图均衡化;根据均衡化的子直方图对图像 $\boldsymbol{L}_1$ 进行灰度映射,得到第二尺度的增强图像 $\boldsymbol{L}_2$。③对图像 $\boldsymbol{L}_2$ 进行整体直方图均衡化,根据均衡处理后的直方图频次进行灰度变换,得到最后的增强光照图像 $\boldsymbol{L}_3$。

对于数据位数为 n 的光照图像 $\boldsymbol{L}$,其灰度级数为 $K = 2^n - 1$,多尺度迭代的直方图均衡处理的具体

方法如下。

①获取图像 $\boldsymbol{L}$ 的直方图 $\boldsymbol{h}_0$：

$$\boldsymbol{h}_0=\{\boldsymbol{h}_0(i)\,|\,\boldsymbol{h}_0(i)=\mathrm{sum}(\boldsymbol{L}==i),i=0,1\cdots K-1\} \tag{12}$$

式中：$\mathrm{sum}(\boldsymbol{L}==i)$ 表示图像 $\boldsymbol{L}$ 中值为 i 的像素数目。

②将直方图 $\boldsymbol{h}_0$ 根据灰度级数量四等分为四个子直方图：

$$\boldsymbol{h}_{0x}=\boldsymbol{h}_0\left(\frac{(x-1)K}{4}:\frac{xK}{4}-1\right),(x=1,2,3,4) \tag{13}$$

③对各子直方图分别进行归一化和均衡化：

$$\boldsymbol{h}_{0x}=\boldsymbol{h}_{0x}/\mathrm{sum}(\boldsymbol{h}_{0x}),(x=1,2,3,4) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{s}_{0x}=\{\boldsymbol{s}_{0x}(i)\,|\,\boldsymbol{s}_{0x}(0)=\boldsymbol{h}_{0x}(0),\boldsymbol{s}_{0x}(i)=\boldsymbol{s}_{0x}(i-1)+\boldsymbol{h}_{0x}(i),i=1\cdots K/4-1,x=1,2,3,4\} \tag{15}$$

④根据四个子直方图的均衡化结果进行灰度级映射，得到增强图像 $\boldsymbol{L}_1$：

$$\boldsymbol{L}_1(\boldsymbol{L}==r_1)=0+\mathrm{round}\left[s_{01}(r_1)\times\left(\frac{K}{4}-1\right)\right],\left(r_1=0,1,\cdots,\frac{K}{4}-1\right)$$

$$\boldsymbol{L}_1(\boldsymbol{L}==r_2)=\frac{K}{4}+\mathrm{round}\left[s_{02}\left(r_2-\frac{K}{4}\right)\times\left(\frac{K}{4}-1\right)\right],\left(r_2=\frac{K}{4},1,\cdots,\frac{2K}{4}-1\right)$$

$$\boldsymbol{L}_1(\boldsymbol{L}==r_3)=\frac{2K}{4}+\mathrm{round}\left[s_{03}\left(r_3-\frac{2K}{4}\right)\times\left(\frac{K}{4}-1\right)\right],\left(r_3=\frac{2K}{4},1,\cdots,\frac{3K}{4}-1\right)$$

$$\boldsymbol{L}_1(\boldsymbol{L}==r_4)=\frac{3K}{4}+\mathrm{round}\left[s_{04}\left(r_4-\frac{3K}{4}\right)\times\left(\frac{K}{4}-1\right)\right],\left(r_4=\frac{3K}{4},1,\cdots,K-1\right) \tag{16}$$

⑤获取图像 $\boldsymbol{L}_1$ 的直方图 $\boldsymbol{h}_1$：

$$\boldsymbol{h}_1=\{\boldsymbol{h}_1(i)\,|\,\boldsymbol{h}_1(i)=\mathrm{sum}(\boldsymbol{L}_1==i),i=0,1\cdots K-1\} \tag{17}$$

⑥将直方图 $\boldsymbol{h}_1$ 根据灰度级数量二等分为两个子直方图：

$$\boldsymbol{h}_{1x}=\boldsymbol{h}_1\left(\frac{(x-1)K}{2}:\frac{xK}{2}-1\right),(x=1,2) \tag{18}$$

⑦对各子直方图分别进行归一化和均衡化：

$$\boldsymbol{h}_{1x}=\boldsymbol{h}_{1x}/\mathrm{sum}(\boldsymbol{h}_{1x}),(x=1,2) \tag{19}$$

$$\boldsymbol{s}_{1x}=\{\boldsymbol{s}_{1x}(i)\,|\,\boldsymbol{s}_{1x}(0)=\boldsymbol{h}_{1x}(0),\boldsymbol{s}_{1x}(i)=\boldsymbol{s}_{1x}(i-1)+\boldsymbol{h}_{1x}(i),i=1\cdots K/2-1,x=1,2\} \tag{20}$$

⑧根据两个子直方图的均衡化结果进行灰度级映射，得到增强图像 $\boldsymbol{L}_2$：

$$\boldsymbol{L}_2(\boldsymbol{L}_1==r_1)=0+\mathrm{round}\left[s_{11}(r_1)\times\left(\frac{K}{2}-1\right)\right],\left(r_1=0,1,\cdots,\frac{K}{2}-1\right)$$

$$\boldsymbol{L}_2(\boldsymbol{L}_1==r_2)=\frac{K}{2}+\mathrm{round}\left[s_{12}\left(r_2-\frac{K}{2}\right)\times\left(\frac{K}{2}-1\right)\right],\left(r_2=\frac{K}{2},\frac{K}{2}+1,\cdots,K-1\right) \tag{21}$$

⑨获取图像 $\boldsymbol{L}_2$ 的直方图 $\boldsymbol{h}_2$：

$$\boldsymbol{h}_2=\{\boldsymbol{h}_2(i)\,|\,\boldsymbol{h}_2(i)=\mathrm{sum}(\boldsymbol{L}_2==i),i=0,1\cdots K-1\} \tag{22}$$

⑩对直方图进行归一化和均衡化：

$$\boldsymbol{h}_2=\boldsymbol{h}_2/\mathrm{sum}(\boldsymbol{h}_2) \tag{23}$$

$$\boldsymbol{s}_2=\{\boldsymbol{s}_2(i)\,|\,\boldsymbol{s}_2(0)=\boldsymbol{h}_2(0),\boldsymbol{s}_2(i)=\boldsymbol{s}_2(i-1)+h_2(i),\ i=1\cdots K-1\} \tag{24}$$

⑪根据均衡化结果进行灰度级映射，得到直方图均衡化后的增强图像 $\boldsymbol{L}_3$：

$$\boldsymbol{L}_3(\boldsymbol{L}_2==r)=\mathrm{round}[s_2(r)\times(K-1)],\ (r=0,1,\cdots,K-1) \tag{25}$$

经过以上步骤处理，得到多尺度迭代的直方图均衡的光照图像 $\boldsymbol{L}_3$，将其与反射图像 $\boldsymbol{R}$ 根据式(6)进行 Retinex 重构，得到增强后的亮度分量 $\boldsymbol{I}_e$；再结合色调分量 $\boldsymbol{H}$ 和饱和度 $\boldsymbol{S}$，将颜色空间由 HSI 转换到 RGB，得到效果理想的增强图像。

作为样例，对图 2(a)所示的光照层进行多尺度迭代的直方图均衡的效果如图 3(a)所示，而最终的低照图像增强效果如图 3(b)所示。很明显，多尺度迭代的直方图均衡处理显著改善了光照层的视觉效果，而对应的低照图像增强效果较为理想。

(a) 增强的光照层　(b) 增强的低照图像

图 3　多尺度迭代直方图均衡的效果

为了清晰表达，将本文方法的整体流程示于图 4。

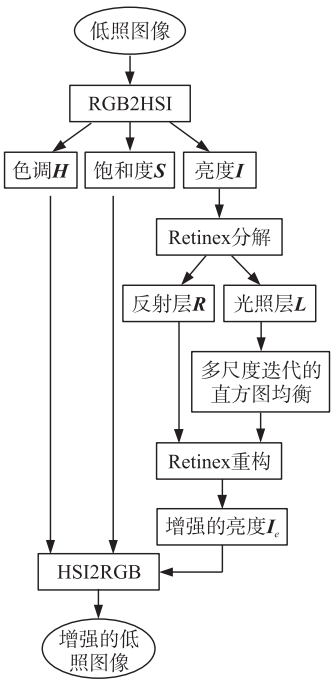


图 4　本文方法的流程图

4　实验结果与验证

为了证明提出方法的可行性和应用价值,在硬件为 i7 CPU 和 8 Gb 内存、软件为 Windows10 和 MATLAB 2013a 的实验平台上进行实验,将最新文献[7]、文献[9]、文献[11]和文献[14]中提出的方法与本文方法应用于八个场景低照图像,原低照图像如图 5 的第一列所示。根据增强图像的视觉感知效果、平均梯度和信息熵对各方法的增强性能进行比较分析。平均梯度和信息熵的定义为[17]

$$G=\frac{1}{3hw}\sum_{d=1}^{3}\sqrt{\frac{\Delta I_{d,x}^2+\Delta I_{d,y}^2}{2}} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{H}=-\sum_{i=0}^{255}\sum_{j=0}^{255}P_{ij}\ln P_{ij},\left(\sum_{i=0}^{255}\sum_{j=0}^{255}P_{ij}=1\right) \tag{27}$$

式中:$\Delta I_{d,x}$和$\Delta I_{d,y}$分别表示第 d 通道图像在水平和垂直方向的梯度,h 和 w 分别为图像的高和宽,P_{ij}为像素取值的概率函数。视觉感知综合评价图像在亮度、对比度和清晰度上是否理想;平均梯度表示图像的高频变化,值越大图像的高频变化越强烈,边缘和细节越清晰,对比度越高;信息熵反映图像的信息表示能力,值越大图像能够表示的信息越多。

4.1　视觉感知效果

选取八个场景低照图像作为实验图像,各方法的增强效果如图 5 所示,其中第 1 列为原八场景低照图像,第 2~6 列分别为文献[7]、文献[9]、文献[11]和文献[14]方法以及本文方法的增强图像。各方法对所有的低照图像在亮度和对比度上均有不同程度的提升。

文献[7]方法的增强效果整体上较好,其中,对图像二进行增强后,亮度适宜,但是颜色发生改变;图像五、六和八的增强效果的光照稍微不足,图像的远景信息未能得到充分显示;图像七增强后的对比度较高,但对远景有部分过增强。

文献[9]方法对图像进行增强处理后,除了对图八的增强效果较为理想之外,其余图像的整体亮度稍微偏暗,部分远处的场景信息不够清晰;图像一和二有类似于雾霾的模糊效果,整体的对比度不高,细节信息不够清晰。

文献[11]方法对所有图像进行增强后,除图像七之外其余图像的亮度较暗,受光照不足的影响,图像的大部分信息显示不清晰;除图像七之外,其余图像的对比度均较低,图像的部分边缘和细节的显示效果较差;另外,图像二的色彩过鲜艳,饱和度过高。

除了图像二的颜色饱和度偏低之外,文献[14]方法对应的增强图像能较好地保持原图像的色彩自然度,但是除图七之外,其余图像的光照严重不足,图像的大部分信息因光照不足未能得以清晰显示。

相对地,本文方法显著地提升了图像的亮度,而不产生过增强,较大地改善了图像的对比度,而不产生背景噪声,图像的纹理细节信息较清晰;原图像中隐藏于暗处的图像信息得到了充分显示。因此,本文方法相对于其他四种方法,具有更好的图像增强性能,对于不同的低照图像均能得到良好的增强效果,具有较强的鲁棒性。

4.2　平均梯度

平均梯度表征图像的高频细节信息和纹理特征,更大的值表示更清晰的图像细节和纹理。为了便于各方法的数据比较,将各方法对八场景低照图像增强后对应的平均梯度值进行可视化表示,如图 6 所示。原低照图像的平均梯度值均较低,各方法均能在不同程度上提升了图像的平均梯度。

对于低照图像一,文献[11]和文献[14]方法对平均梯度的提升幅度较小,文献[9]方法的平均梯度处于中等水平,而文献[7]方法以及本文方法的提升幅度相对较大,两者基本持平。对于图像二,文献[7]和本文方法的平均梯度较高,文献[9]方法次之,而文献[11]和文献[14]方法的平均梯度较低。图像三和四的实验结果类似,文献[11]和文献[14]方法的平均梯度最低,文献[9]方法处于中等,文献[7]方法的平均梯度相对较高,而本文方法的平均梯度明显高于其他方法。图像五和六的实验结果类似,文献[11]和文献[14]方法的平均梯度相对较

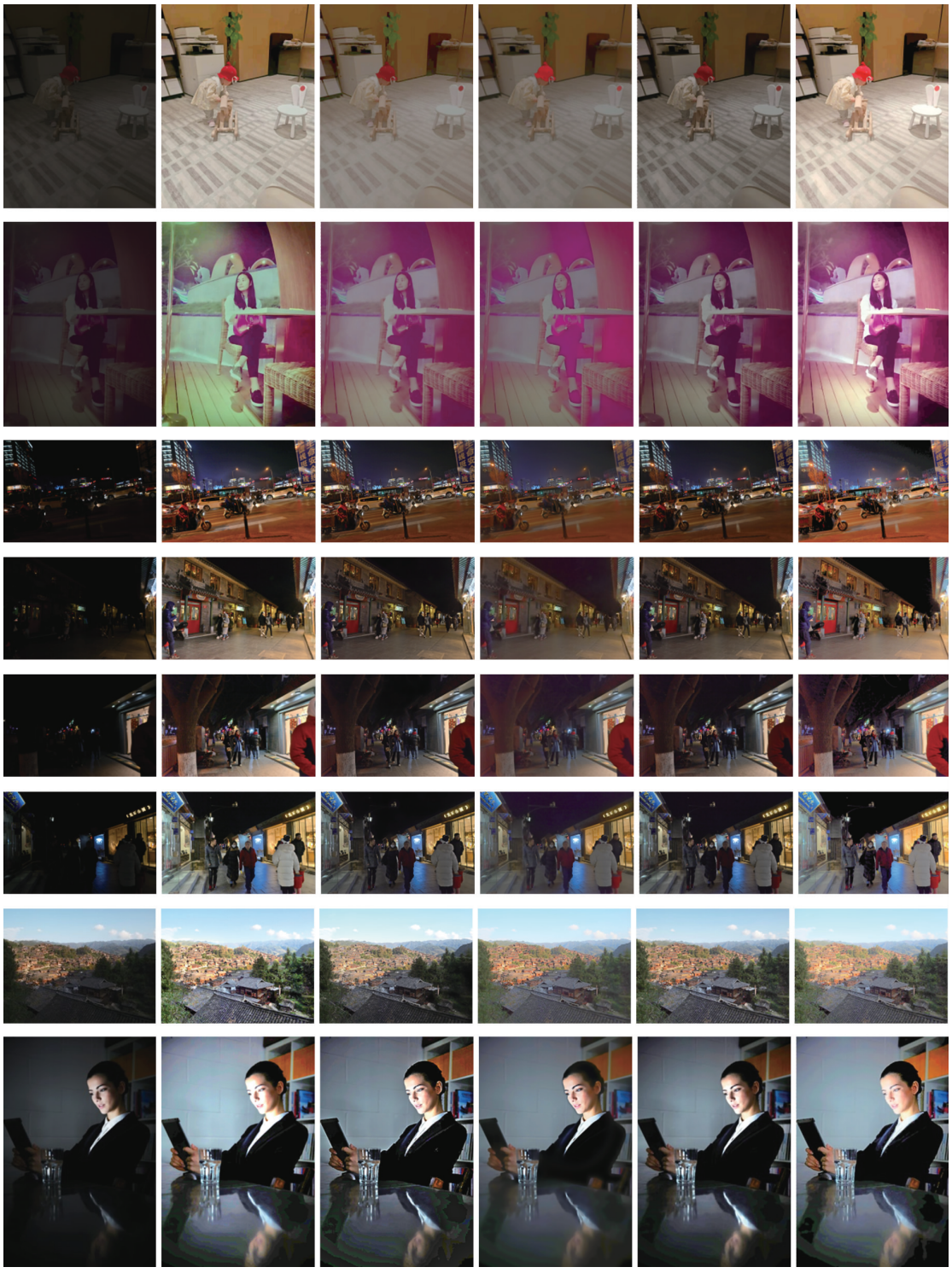


图 5　各方法对八场景低照图像的增强图像

低,文献[9]方法的平均梯度高于文献[11]和文献[14]方法,处于中等幅度。文献[7]方法的平均梯度相对较高,而本文方法在平均梯度上取得较为显著的结果,大大提升了图像的对比度。各方法对图像七的平均梯度提升的幅度较明显,其中文献[7]方法和本文方法的平均梯度值最高,文献[9]方法次之,而文献[11]和文献[14]方法最低。对于图像八,文献[7]和文献[9]方法的平均梯度相对较高,且与本文方法的平均梯度较为接近,文献[11]和文献[14]方法的平均梯度偏低,而本文方法高于所有的方法。

从以上的比较分析可知,对于不同的低照图像,部分方法的平均梯度均较低,比如文献[11]和文献[14]方法,而部分方法的平均梯度对于部分图像较

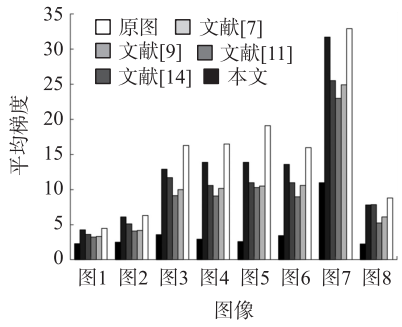


图 6　各方法增强后的平均梯度

高,而对于其余图像较低,比如文献[9]方法。相对地,本文方法的平均梯度始终保持较高值,较好地提升了图像的对比度,在更大程度上清晰化图像的细节和纹理的显示。

4.3　信息熵

信息熵反映图像的信息表示能力,信息熵越大,图像的信息表示能力越强。将各方法对八场景图像进行增强后的信息熵可视化为柱状图,如图 7 所示。各方法对各低照图像的信息熵均有不同程度的提升。

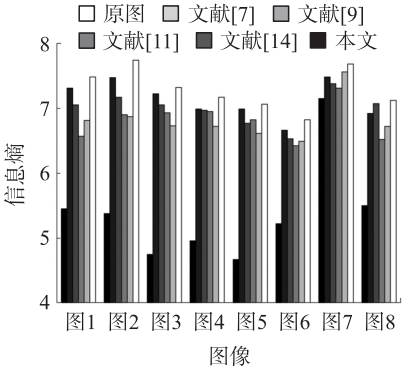


图 7　各方法增强后的信息熵

对于图像一和二,文献[11]和文献[14]方法的信息熵较低,文献[9]方法处于中等,而文献[7]方法以及本文方法的信息熵相对较高,其中以本文方法的信息熵最高,文献[7]方法次之。对于图像三,文献[7]方法的信息熵较高,接近于本文方法,文献[9]次之,文献[11]和文献[14]方法最低,而本文方法的信息熵高于所有方法。对于图像四,文献[14]方法的信息熵较低,文献[7]、文献[9]和文献[11]方法的信息熵相差不大,均较高,而本文方法比文献[7]、文献[9]和文献[11]方法高出 0.25 左右。对于图像五,本文方法的信息熵最高,文献[7]方法次之,与本文方法相差不大,其次为文献[11]和文献[9]方法,文献[14]方法最低。对于图像六,本文方法的信息熵明显高于其他方法,文献[7]方法处于中等,而文献[9]、文献[11]和文献[14]方法相对较低。对于图像七,由于原图像本身的光照效果稍好,各方法对原图像的信息熵的提升幅度不大,并且各方法对应的信息熵差别较小,其中以本文方法的信息熵最高。对于图像八,文献[9]和本文方法的信息熵最高,两者几乎持平,文献[7]方法处于中等水平,而文献[11]和文献[14]方法的信息熵偏低。

从以上分析可知,对于八场景低照图像的增强,文献[7]和文献[9]方法的信息熵相对优于文献[11]和文献[14]的方法,而本文方法在信息熵上整体优于其他方法。因此,本文方法能更好地提升低照图像的有效信息,其增强图像具有更好的信息表示能力。

5　结论

提出的结合多尺度迭代直方图均衡的低照图像增强算法,将图像的颜色空间由 RGB 转换到亮度分量与颜色分量独立的 HSI 空间,用具有良好边缘保持能力的双边滤波估计亮度分量的光照层,提出多尺度迭代的直方图均衡方法,以对光照层图像进行增强。质化与量化的实验结果证明,相对于最新提出的图像增强方法,本文方法具有更好的低照图像增强能力,在显著改善图像的亮度和对比度的同时,能够避免过增强和噪声放大,图像的视觉效果较清晰。

参考文献:

[1] Li C L, Zhu J J, Bi L H, et al. A Low-Light Image Enhancement Method with Brightness Balance and Detail Preservation[J]. PLoS ONE, 2022, 17(5): e0262478.

[2] Reegan J, Balasubramaniam P. Low Light Enhancement Algorithm for Color Images Using Intuitionistic Fuzzy Sets with Histogram Equalization[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(6): 8093-8106.

[3] Li L, Peng W H, Duan Z P, et al. Adaptive Illumination Estimation for Low-Light Image Enhancement[J]. Engineering Letters, 2024, 32(3): 531-540.

[4] Bui T A, Lee P J, Liang C S, et al. Edge-Computing-Enabled Deep Learning Approach for Low-Light Satellite Image Enhancement[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 4071-4083.

[5] Thepade S D, Pardhi P M. Contrast Enhancement with Brightness Preservation of Low Light Images Using a Blending of CLAHE and BPDHE Histogram Equalization Methods[J]. International Journal of Information Technology, 2022, 14(6): 3047-3056.

[6] Singh D, Kumar S. Infrared Image Enhancement Using Differential Evolution Based on Double Plateau Histogram

Equalization[C]//10th International Conference on Soft Computing for Problem Solving, Online, 2021: 757-770.

[7] Patil A, Chaudhari T, Deo K, et al. Low Light Image Enhancement for Dark Images[J]. International Journal of Data Science and Analysis, 2020, 6(4): 99-104.

[8] Li C, Tang S, Yan J, et al. Low-Light Image Enhancement Based on Quasi-Symmetric Correction Functions by Fusion [J]. Symmetry, 2020, 12(9): 1561.

[9] Mukaida M, Ueda Y, Suetake N, et al. Low-Light Image Enhancement Method Using a Modified Gamma Transform and Gamma Filtering-Based Histogram Specification for Convex Combination Coefficients[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2023, E106A(11): 1385-1394.

[10] Mayathevar K, Veluchamy M, Subramani B. Fuzzy Color Histogram Equalization with Weighted Distribution for Image Enhancement[J]. Optik, 2020, 216(1): 164927.

[11] Mohammad A, Zohair A. Retinex-Based Multiphase Algorithm for Low-Light Image Enhancement[J]. Traitement du Signal, 2020, 37(5): 733-743.

[12] 罗国强,陈家益. 改进双边滤波与平均γ矫正的图像增强[J]. 传感技术学报,2022,35(5):644-649.

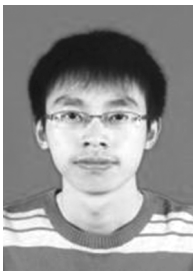
[13] Ma L, Liu R S, Zhang J A, et al. Learning Deep Context-Sensitive Decomposition for Low-Light Image Enhancement [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(10): 5666-5680.

[14] Praveena M, Pavan K, Asha D. Enhancing Visibility of Low-Light Images Using Deep Learning Techniques[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8(6): 298-301.

[15] Khan R, Liu Q, Yang Y. A Deep Hybrid Few Shot Divide and Glow Method for Ill-Light Image Enhancement[J]. IEEE Access, 2021, 9: 17767-17778.

[16] 宋蕊,吴琛. 基于改进 DBSCAN 和双边滤波算法的点云去噪[J]. 电子器件,2023,46(4):1083-1088.

[16] 房涛,方琳灵,刘艳,等. 基于 FHN 神经元自适应多通道随机共振图像增强[J]. 传感技术学报,2022,35(11):1521-1529.



张文涛(1988—),男,江西丰城人,硕士,讲师,研究方向为图像处理与单片机应用技术,806772265@qq.com。