

基于直方图均衡化图像增强的 两种改进方法

董丽丽, 丁畅, 许文海

(大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)是图像增强领域中基础性很强的方法,对其研究和改进工作至关重要. 首先,本文分析了经典HE算法的缺点,也概括了五类基于直方图均衡化的图像增强技术,然后针对HE经典算法的缺点提出了两种改进方法,分别引入了直方图动态削峰技术和边缘信息融合技术,最后选取曝光不足和过曝光的两类图像验证算法的性能,采取了有效的图像客观质量评价指标对实验结果做出评价. 结合主客观图像质量评价可以看出,本文提出的算法具有增强效果好、输入参数少等特点.

关键词: 图像增强; 直方图均衡化; 子直方图均衡化; 极大值搜索; 动态削峰; 边缘锐化; 信息融合

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2018)10-2367-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.10.009

Two Improved Methods Based on Histogram Equalization for Image Enhancement

DONG Li-li, DING Chang, XU Wen-hai

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: HE (Histogram Equalization) is a fundamental method in the field of image enhancement, the research and improvement about which is very significant. First, this paper analyzes the disadvantages of the classical HE algorithm and summarizes five kinds of image enhancement techniques based on HE. Then, two kinds of improved methods are proposed aiming at the disadvantages of the classical HE algorithm, the techniques of the peak clipping and the edge information fusion are introduced. Finally, underexposure and overexposure images are selected to verify the algorithms' properties, the standard of efficient image objective quality assessment is selected to evaluate the experimental results. The assessment of image subjective and objective quality shows the algorithms this paper proposes have the characteristics of better results, less input parameters and so on.

Key words: image enhancement; histogram equalization; sub-histogram equalization; maximum value searching; peak clipping dynamically; edge sharpening; information fusion

1 引言

直方图均衡化^[1,2] (Histogram Equalization, HE) 技术可广泛应用于图像增强^[3]、光照补偿^[4]、图像去雾^[5,6]等多个领域;国内外很多研究人员致力于HE方法的研究及改进工作;很多关于图像增强的研究工作在结果对比时着重参考HE方法. 以上三点可充分说明HE方法潜力大、关注度高、剪性强,因此对其总结、改进等工作都至关重要.

经典HE算法的优点在于时域处理、计算简单、易

于实现,其缺点^[2]主要为:①灰度级个数减小,信息熵下降,局部细节缺失;②算法未考虑图像边缘信息,不能用于细节增强;③平均灰度值固定. 国内外学者关于经典HE算法的改进可分为五类^[2]. 第一类是子直方图均衡化技术^[7-12],主要用于亮度保护下的图像对比度增强. 代表性算法如BBHE (Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization) 算法^[7]、DSIHE (Dualistic Sub-Image Histogram Equalization) 算法^[8]、MMBEBHE (Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization) 算法^[9]、RMSHE (Recursive Mean-Separate Histogram Equaliza-

收稿日期:2017-09-15;修回日期:2018-03-26;责任编辑:孙瑶

基金项目:国家科技支撑计划(No. 2014BAB12B03);国家自然科学基金(No. 61501077);中央高校基本科研业务费专项资金(No. 3132016351, No. 3132018189)

tion)算法^[10]等. 第二类技术是修正的直方图均衡化技术^[13-16], 主要针对某些特定灰度级进行对比度增强. 代表性算法如 AHE (Adaptive Histogram Equalization) 算法^[13]. 第三类技术是直方图变分技术^[17,18], 主要用于亮度保护下的图像对比度增强. 第四类是局部直方图均衡化技术^[19,20], 主要用于图像细节增强. 代表性算法如 POSHE (Partially Overlapped Sub-block Histogram Equalization) 算法^[20]. 第五类是基于变换域均衡化的图像增强技术^[21-24], 主要用于图像细节增强.

2 自适应子直方图均衡化增强算法

保持图像亮度的自适应子直方图均衡化增强算法 (Brightness Preserving Adaptive Sub-Histogram Equalization, BPASHE) 属于子直方图均衡化技术, 目的是以保护图像的亮度为前提做到图像对比度的提升. 自然图像直方图特点为相邻灰度级的频率变化缓慢. 这样可考虑将直方图分解为波谷-波峰-波谷的形式, 重点在于搜索极大值, 以极大值为中心的一个合适范围就可确定一个局部峰, 最后分别对局部峰做均衡化处理来实现该算法. BPASHE 算法的优点表现为以下三个方面. (1) 一幅图像直方图若出现局部峰, 一定是图像显著性的灰度范围, 在局部峰均衡化处理前后, 每段灰度级个数的比例不变, 这样就会更有效地保护图像的亮度. (2) 针对于直方图局部峰做均衡化, 可在一定程度上避免灰度级个数的大量减少. (3) 局部峰划分情况对于待增强图像的直方图趋势自适应. 分段个数与分段阈值不预先指定, 实现自适应.

BPASHE 算法对于经典 HE 算法的①③两个缺点改善明显, 算法中唯一的参数为搜索极大值时选用的邻域半径 δ .

2.1 BPASHE 算法机制分析

子直方图均衡化技术目的在于以保护图像的亮度为前提做到对比度增强. 该技术需要使图像亮度的改变在可接受范围内做到较好的对比度增强效果. 准确而言, 亮度保护与对比度增强两者对立, BPASHE 算法在搜索极大值时所涉及到的邻域半径 δ 就可以实现两者的平衡. BPASHE 算法中的 δ 描述了极大值选取的宽严程度. 若 δ 越小, 直方图极大值所达到的标准变得容易, 更多的极大值会被搜索到, 划分的局部峰也越密, 每个局部峰内的灰度值范围也越小, 增强结果的亮度越接近于原图, 但对原图的对比度提升也越小.

2.2 算法实现步骤

首先, 借鉴数学分析中对极大值的定义来搜索局部峰值, 如式(1), 式(1)中的 v_n 表示搜索到的第 n 个极大值, δ 为领域半径.

$$h(v_n) \geq h(x) \quad x \in [v_n - \delta, v_n + \delta] \quad (1)$$

然后, 需要根据以上搜索出的极大值对原直方图划分出局部峰区间, 本文采取相邻峰值点的平均数计算出局部峰区间端点, 见式(2), 进而完成区间划分. 利用 $\mathbf{v} = (v_1, v_2 \cdots v_n, v_{n+1} \cdots v_{N-1}, v_N)$ 代表极大值, 利用 $\mathbf{t} = (t_1, t_2 \cdots t_n, t_{n+1} \cdots t_{N-1}, t_N, t_{N+1})$ 代表局部峰端点, 同时需要考虑到图像的最小灰度值 0 和最大灰度值 255 应分别为第一个局部峰的左端点和最后一个局部峰的右端点, 即 $t_1 = 0, t_{N+1} = 255$. 区间划分的具体情况见式(3)等号右边. 相应地, 原图像按上述划分情况形成的子图像(集合 \mathbf{X}_n) 如式(4). 需要指出的是若采取的邻域半径仅搜索到一个峰值点, 此时直方图大致可以用一个单峰描述, 仅做一个整体区间的均衡化即可削去这个单峰, 那么 BPASHE 算法回归到经典 HE 算法, 上述讨论适用于搜索到至少两个峰值点的情况.

$$t_n = \frac{v_{n-1} + v_n}{2} \quad (n=2, 3, \cdots, N) \quad (2)$$

$$[t_1, t_{N+1}] = [t_1, t_2] \cup (t_2, t_3) \cup \cdots \cup (t_N, t_{N+1}] \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_n = \{I(i, j); t_n < I(i, j) \leq t_{n+1}, \forall I(i, j) \in I\} \quad (4)$$

最后, 需要对以上按区间分割成的子图像进行子直方图均衡化. 局部峰均衡化先要统计灰度值在子图像内的比例而后计算累加后的频率分布, 最后计算子直方图均衡化之后的灰度值. 设 X_n 中的有灰度值大小为 x_n 的元素, x_n 在 X_n 中的累加频率为 $CDF(x_n)$, 那么 x_n 经过局部均衡化后得到的 y_n 计算公式如式(5), 对原图像每一个灰度值都按式(5)计算, 并将各区间合成可得出 BPASHE 算法结果.

$$y_n = t_n + (t_{n+1} - t_n) \times CDF(x_n) \quad (5)$$

2.3 实验结果分析

本文选取曝光不足天鹅图像做算法的实验, 如图 1(a), 以下简称图像 I, 本文中所有实验采用的仿真软件为 MATLAB R2012a 32 位. 本节实验中选取不同的领域半径值, 分别列出 BPASHE 算法中峰值点、局部峰端点值、局部峰所在的子区间等具体数据, 又列出了不同邻域半径下得出的不同增强结果便于总结该算法的性能. 采取平均灰度值描述图像的亮度, 采取 EME (Enhancement Measure by Entropy) 指标^[25]评价图像的对比度. 目前, EME 指标已被广泛地用于图像对比度的评价, 主要原理是对图像进行分块根据每块中的最大灰度值和最小灰度值衡量图像整体的对比度, 计算方法如式(6), k_1 和 k_2 分别表示整幅图像高和宽分块时序号的末尾值, 实际计算时应引入 c 这一个小的正常数, 为避免分式无意义设置, 本文计算时将其设定为 0.1, 同时采用 3×3 大小的块, 按各块相等的权重计算出每幅图像的结果, EME 值越大, 该幅图像的对比度越高.

$$EME = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} 20 \ln \left(\frac{\max(X_{i,j})}{\min(X_{i,j}) + c} \right) \quad (6)$$

图像 I 的特点为曝光不足,图像的整体亮度偏低,直方图特点为像素分布偏向于低灰度值,不同邻域半径下区间的划分情况见表 1,从中可看出搜索极大值邻域半径选取得越小,搜索到的极值点越多,相应地区间划分得也越密. BPASHE 算法在不同参数下对图像 I 的

增强结果见图 2,图像质量分析见表 2,从中可看出邻域半径取值越小越有利于保持原图的亮度,但取得过小就会出现对原图对比度提升不够的问题,如 $\delta = 20$. 综合对原图的亮度保护以及对原图对比度增强两方面考虑, $\delta = 40$ 较为合适.

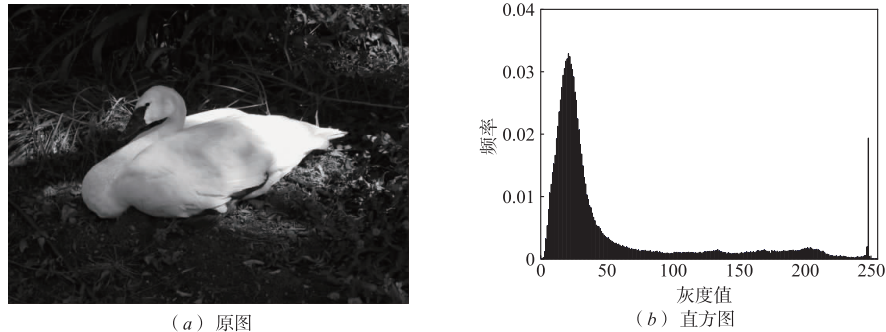


图1 待增强图像 I 及其直方图

表 1 BPASHE 算法应用于图像 I 在不同邻域半径下的区间划分情况

	$\delta = 20$	$\delta = 40$	$\delta = 50$	$\delta = 120$	$\delta = 255$ (经典 HE 算法)
ν (峰值点)	(21, 134, 169, 202, 248)	(21, 134, 202, 248)	(21, 134, 248)	(21, 248)	\
t (区间端点值)	(0, 78, 152, 186, 225, 255)	(0, 78, 168, 225, 255)	(0, 78, 191, 255)	(0, 135, 255)	(0, 255)
区间划分情况	[0, 78] [79, 152] [153, 186] [187, 225] [226, 255]	[0, 78] [79, 168] [169, 225] [226, 255]	[0, 78] [79, 191] [192, 255]	[0, 135] [136, 255]	[0, 255]

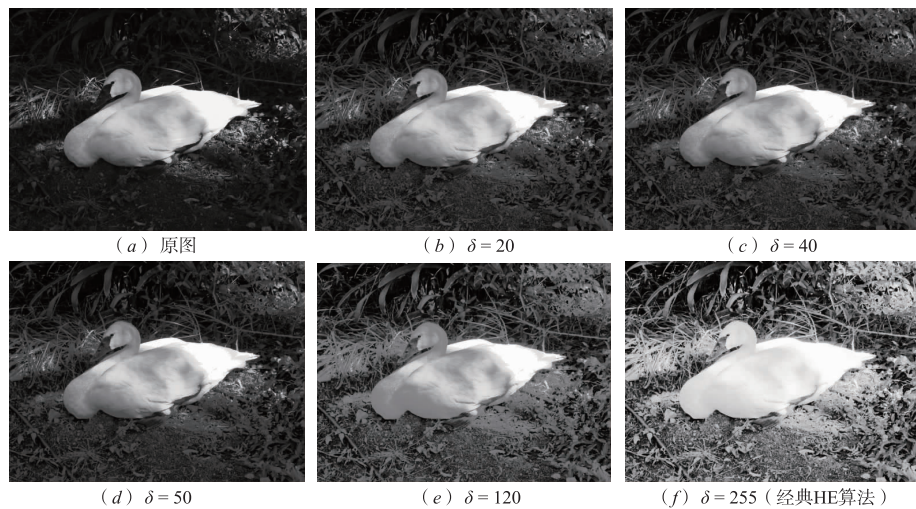


图2 BPASHE算法在不同参数下对图像 I 的增强结果

结合以上论述及实验结果分析,可知 BPASHE 算法参数调整经验为邻域半径 δ 越小越有利于保持原图的亮度,但过小的 δ 会导致对比度增强不够;相反邻域

半径 δ 取值越大,对原图的对比度提高也越大,但过大的 δ 会引起亮度迁移. 实际应用中可根据实验结果的特点依照 δ 对增强结果的改变规律做参数的进一步优化.

一般来讲,若待增强图像直方图变化比较缓慢, δ 可适当调高,若待增强图像直方图频率变化相对剧烈, δ 可适当调低. $\delta=40$ 可作为该算法的优化参数.

表2 BPASHE 算法对图像 I 在不同参数下增强结果的质量分析

	图 2(a)	图 2(b)	图 2(c)	图 2(d)	图 2(e)	图 2(f)
平均灰度	53	65	65	65	86	127
EME	13.45	15.26	20.03	21.27	22.35	23.79

3 图像细节增强的 HEEF 算法

针对于经典 HE 算法的缺点②,本文又提出了基于边缘信息融合的细节增强算法(Histogram Equalization with Edge Fusion, HEEF),主要思路为 Laplace 算法的处理结果与经典 HE 算法处理结果按比例加权融合,该算法实现简单,但对图像细节增强有效.以下将着重分析两种算法的性能及局部区域的效果,并重点指出两种算法可以融合的原因.

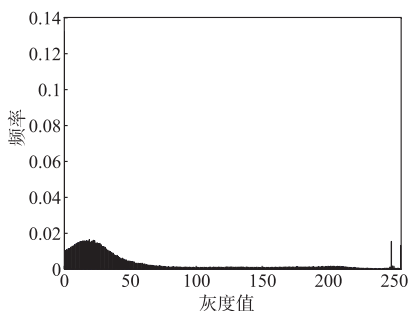
3.1 Laplace 滤波增强算法的性能分析

Laplace 滤波算法是通过空域滤波对图像增强的典型方法,主要用于图像的细节锐化^[1],本节从该算法对于原图像平均灰度、灰度级个数和原图像直方图的变化三个方面分析 Laplace 滤波算法的性能.

图 3(b) 示出了 Laplace 滤波结果的直方图,与图 1(b) 对比可以看出,该增强算法保持了原图像直方图的大体走势.表 3 列出了 Laplace 算法的平均灰度值与灰度级个数,可看出该算法的增强结果与原图像的平均灰度值非常接近,该算法无法调节原图像的亮度,但可以增大原图像灰度级个数.



(a) 图像 I 经 Laplace 滤波后的增强结果



(b) Laplace 滤波后的直方图

图3 Laplace 滤波结果及直方图

表3 Laplace 滤波结果的图像质量分析

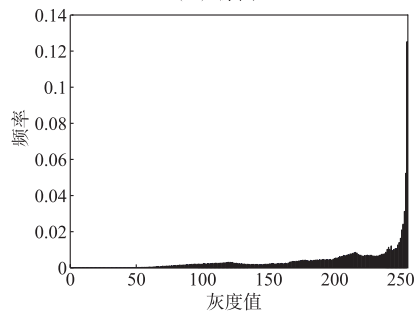
	图像 I	图 3(a)
平均灰度	53	55
灰度级个数	249	256

3.2 经典 HE 算法与 Laplace 锐化算法的局部效果分析

本节重点研究经典 HE 算法和 Laplace 锐化算法对图像局部区域的质量提升情况.本节在算法原理论述中,所选取的图像数据为图像 I 与图像 II,图像 II 如图 4(a),特点为过度曝光,直方图特点为像素集中分布在高灰度值.本节首先在原图像中有针对性地选取四个区域,进而指出一些问题和总结出一般规律,本节中利用局部区域的直方图和局部区域的客观质量评价指标来分析两种算法的局部性能.



(a) 原图



(b) 直方图

图4 待增强图像 II 及其直方图

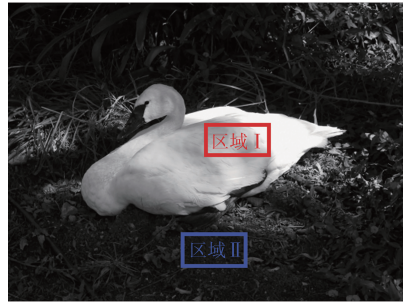
本节中所选定的四个区域具体见图 5,区域宽高分别为 80 和 40,共 3200 个像素点.区域 I 用红色框图标注,取自天鹅羽毛的一部分,亮度偏高.区域 II 用蓝色框图标注,取自草坪的一部分,亮度偏低.区域 III 用绿色框图标注,取自路面的一部分,亮度偏高,区域 IV 用黄色框图标注,取自树叶的一部分,亮度偏低.

表 4 列出了原图、经典 HE 算法与 Laplace 算法的局部区域(子块图像的右侧数字为其编号),在主观视觉方面可以明显地看出经典 HE 算法在区域 I 和区域 IV 内发生了局部细节缺失,如区域 I 天鹅羽毛细节的缺失和区域 IV 树叶细节的缺失,但对于区域 II 和区域 III 的细节提升效果很明显,对比度得到了合理的增强,

其本质原因为灰度级的频率决定对比度增强程度^[2]. 表 5 列出了两种算法局部区域内的质量评价指标,本节中采用了区域灰度范围、区域平均灰度、区域灰度级个数和区域平均梯度用具体数据客观评价区域内的图像质量. 区域灰度范围为区域内灰度值的范围,其范围越广图像质量越高,区域平均灰度反映了区域内的亮度,区域灰度级个数反映区域灰度值的丰富程度,数值

越大,区域内图像质量越高. 区域平均梯度反映区域内细节丰富程度,数值越大区域内图像质量越高,计算模型如式(7), M 和 N 分别代表高和宽, f 代表图像的灰度值, ∇ 为梯度算子.

$$AG = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} |\nabla f(i,j)|}{(M-1)(N-1)} \quad (7)$$



(a) 区域 I 和区域 II 选取示意



(b) 区域 III 和区域 IV 选取示意

图5 四个局部区域选取示意图

表 4 经典 HE 算法与 Laplace 算法结果的区域展示











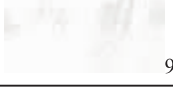

	区域 I	区域 II	区域 III	区域 IV
原图	 1	 4	 7	 10
经典 HE 算法	 2	 5	 8	 11
Laplace 算法	 3	 6	 9	 12

表 5 经典 HE 算法和 Laplace 算法的局部区域质量分析

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
灰度范围	[135,249]	[223,255]	[92,255]	[11,73]	[16,206]	[0,189]	[244,255]	[158,255]	[227,255]	[41,189]	[0,73]	[0,255]
平均灰度	196	240	196	26	119	27	252	213	252	90	9	92
灰度级个数	114	9	144	59	34	117	16	14	27	125	16	242
平均梯度	3.04	1.05	11.02	5.30	31.83	24.06	0.69	5.97	2.25	14.83	6.45	74.53

表 5 的统计数据所呈现的规律非常明显,结论如下:

(1) 对于区域灰度范围,经典 HE 算法仅拓展了区域 II 和 III 的灰度范围,区域 I 和区域 IV 的灰度范围缩小,原因在于该区域内的灰度值占整体的频率较低. 而 Laplace 算法对四个区域都可进行拓展.

(2) 对于区域平均灰度值,经典 HE 算法结果可改变原区域的平均灰度值,而 Laplace 锐化算法的平均灰度值基本与原区域接近,无法调节原区域的亮度.

(3) 对于区域灰度级个数,在所选四个区域中经典

HE 算法结果灰度级个数都减少,而 Laplace 算法有效地增加了四个区域的灰度级个数.

(4) 对于区域平均梯度,经典 HE 算法仅提升了区域 II 和 III 和平均梯度值,区域 I 和区域 IV 内的平均梯度值减小. 而 Laplace 算法提升了四个区域的平均梯度值.

通过上述可以看出,经典 HE 算法的优点为可调节图像局部区域的亮度,缺点为局部细节缺失. Laplace 算法的优点为提升图像的纹理细节,缺点为不能调节图像局部区域的亮度. 两者算法的融合可作为图像细节

增强的有效方法.

3.3 HEEF 算法的实现与结果分析

HEEF 算法是引入边缘信息融合技术的直方图均衡化方法,通过经典 HE 算法和 Laplace 锐化算法进行像素级融合实现. HEEF 算法的数学模型如式(8),该模型的唯一参数为加权比例,具备参数少、计算简单的特点.

$$I_{\text{HEEF}} = \lambda I_{\text{HE}} + (1 - \lambda) I_{\text{Laplace}} \quad (8)$$

式(8)中 λ 为加权参数,若 $\lambda = 0$ 该方法退化至 Laplace 锐化算法,若 $\lambda = 1$ 该方法退化至经典 HE 算法. 当

λ 介于两数值中间时为有效的 HEEF 算法. 本文取 $\lambda = 0.2, \lambda = 0.5, \lambda = 0.8$ 三种不同参数做 HEEF 算法的实验结果,如图 6 和图 7 所示. 通过图 6 和图 7 中各子图的视觉效果可以看出 λ 取值越大,对于原图像的增强程度越大,但与此同时也发生了较为明显的局部细节缺失,当 $\lambda = 0.5$ 时增强效果较好,可作为该算法的优化参数,其物理意义为经典 HE 算法和 Laplace 算法像素级等比例融合,在优化参数下的增强结果细节信息非常丰富,原图阴暗区域中的细节全部得到合理地增强.

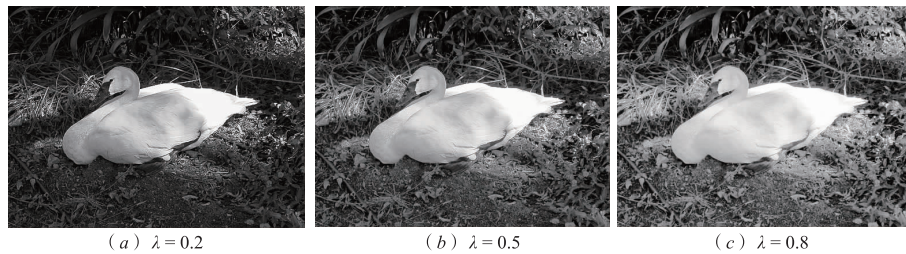


图 6 HEEF算法对于图像 I 在不同参数 λ 下的增强结果



图 7 HEEF算法对于图像 II 在不同参数 λ 下的增强结果

4 算法结果的质量评价

本文采用了平均灰度值评价算法结果对于原图亮度的改变. 对于图像对比度增强与图像细节增强需选用灰度范围、平均灰度、灰度级个数、信息熵、平均梯度、EME^[25] 等图像客观评价指标,信息熵反映图像平均信息量,数值越大图像质量越高,计算模型如式(9), p_i 表示图像灰度级的频率, N 表示图像灰度级个数(频率为 0 的灰度级,当次计算结果为 0). 这些评价指标在评

价图像质量时也各有侧重. 如经典 HE 算法会提升原图像整体的平均梯度,但通过表 5 中数据可看出经典 HE 算法使得区域 I 和区域 IV 的平均梯度下降,这就需要采取多个指标共同评价.

$$\text{Entropy} = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (9)$$

图 8 和图 9 列出了直方图变换相关算法的结果,表 6 和表 7 列出了增强结果的图像质量评价数据.

表 6 对于图像 I 各算法增强结果的质量客观评价

	图 1(a)	图 8(a)	图 8(b)	图 8(c)	图 8(d)	图 8(e)	图 8(f)	图 8(g)	图 8(h)	图 8(i)
灰度范围	[1, 249]	[0, 255]	[1, 249]	[1, 249]	[0, 255]	[1, 249]	[1, 255]	[0, 255]	[0, 255]	[0, 255]
平均灰度	53	127	58	82	58	55	125	119	65	91
灰度级个数	249	50	195	138	200	198	255	256	192	256
信息熵	6.59	5.57	6.37	6.29	6.38	6.38	7.78	7.93	6.35	7.69
平均梯度	7.85	23.81	9.73	19.47	10.11	9.77	21.72	22.64	10.87	24.78
EME	13.45	23.79	18.69	26.90	21.55	21.20	15.55	27.64	20.02	28.43

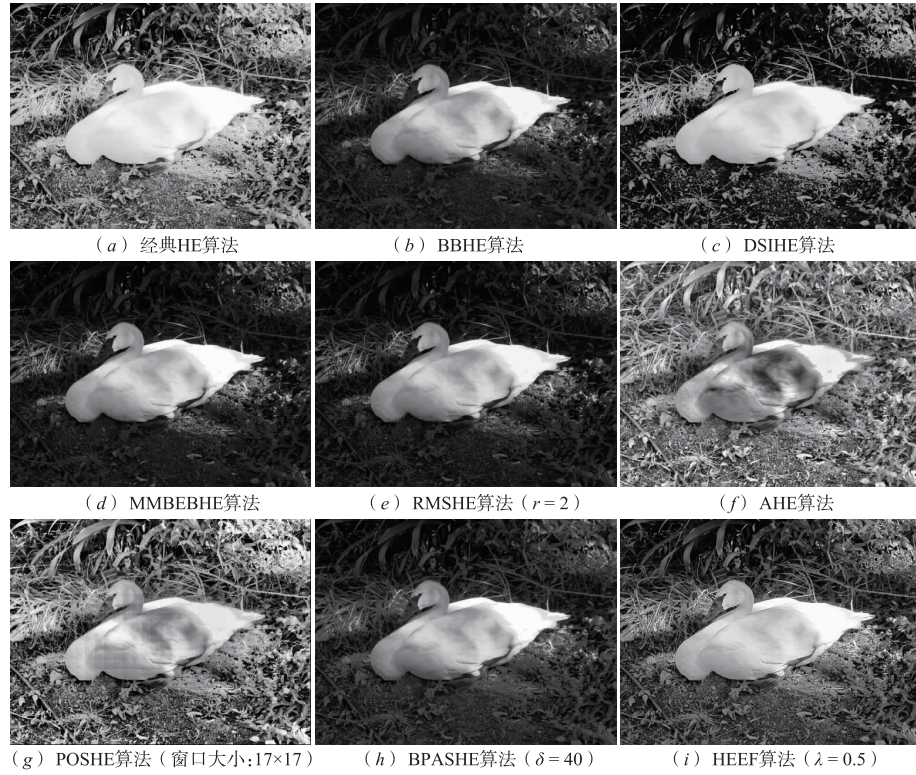


图8 本文提出的两种算法与HE相关改进算法结果之间的比较

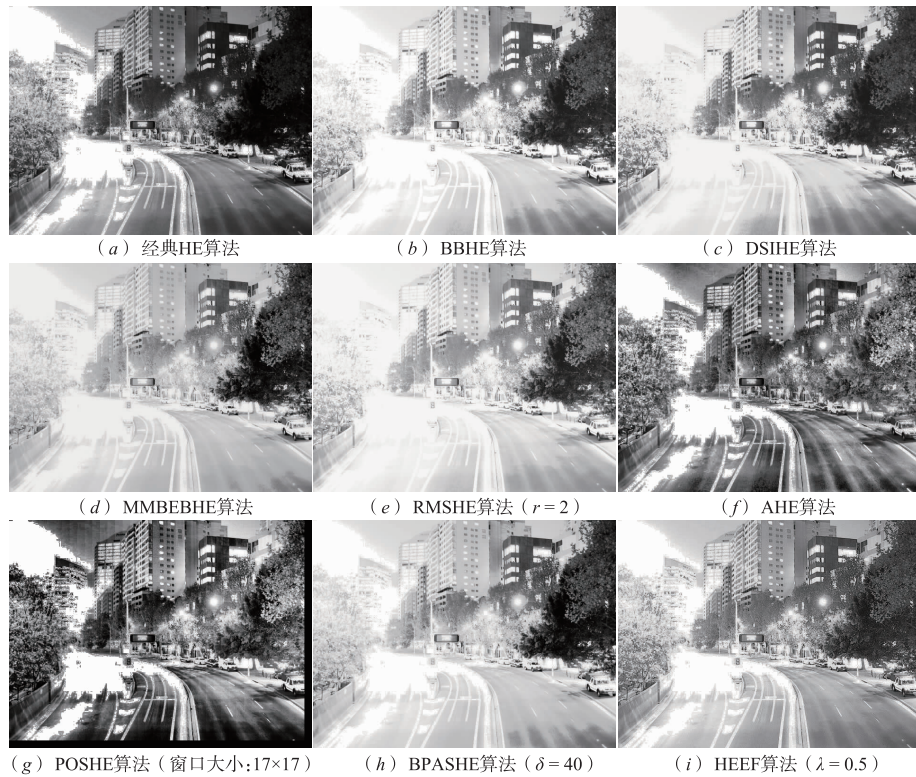


图9 本文提出的两种算法与HE相关改进算法结果之间的比较

结合视觉效果和数据分析,可得如下结论. 经典HE算法结果一定程度上改善了图像的质量,但存在灰

度级个数的缺失和信息熵的下降,发生了平均灰度值的迁移. BBHE算法^[7]较好地保持了原图像的亮度,比

经典 HE 算法保留了更多的灰度级个数,但对于图像细节信息的增强不够,DSIHE 算法^[8]结果出现了失真. MMBEBHE 算法^[9]结果达到了保持亮度不变的效果,但对于图像细节的丰富不够. 对于 RMSHE 算法^[10],本节选取了递归深度 $r = 2$ 做出了实验结果,增强效果比 MMBEBHE 算法结果略好,但对图像整体质量水平的提升不够. AHE 算法^[13]的结果在灰度级个数和信息熵方面对原图有很大程度上的改进,但从图 8(f)和图 9(f)可以看出该算法出现了图像局部区域的失真,POSHE 算法^[20]结果的优点与 AHE 算法几乎相同,对原图像的

灰度级个数和信息熵会提升很多,但增强结果出现了断层效应,且局部区域发生了失真. 本文第 2 节提出的 BPASHE 算法($\delta = 40$)结果如图 8(h)和图 9(h),在保持原图的亮度和提升 EME 指标两个方面占优,可用于保护图像亮度下的对比度增强. 本文第 3 节提出的 HEEF 算法($\lambda = 0.5$)的结果如图 8(i)和图 9(i)所示,从视觉效果上看,增强结果的细节比原图像丰富了很多,使原图像的信息熵、平均梯度与 EME 指标提升了很多,与其它算法相比优势也非常明显,HEEF 算法可用于图像细节的增强.

表 7 对于图像 II 各算法增强结果的质量客观评价

	图 4(a)	图 9(a)	图 9(b)	图 9(c)	图 9(d)	图 9(e)	图 9(f)	图 9(g)	图 9(h)	图 9(i)
灰度范围	[27,255]	[0,255]	[27,255]	[27,247]	[0,242]	[27,249]	[1,255]	[0,255]	[0,255]	[0,255]
平均灰度	206	129	191	182	185	200	140	120	186	166
灰度级个数	227	53	169	157	166	174	255	256	168	236
信息熵	6.58	5.46	6.38	6.29	6.30	6.36	7.03	7.27	6.44	7.15
平均梯度	7.97	13.48	10.23	10.51	9.49	8.87	20.34	20.14	10.38	20.84
EME	2.77	11.99	4.38	4.62	6.16	3.77	10.43	12.34	6.67	13.36

5 结论与展望

本文对经典直方图均衡化方法做出了两方面的改进,并采用了合理的图像客观质量评价指标说明算法的有效性. BPASHE 算法可用于图像亮度保护下的对比度增强,满足消费类电子产品的应用需求. HEEF 算法可用于图像的细节增强. 两种算法同时具备参数少、增强效果优异等优点,可以较好地应用于图像增强领域.

对于直方图与直方图均衡化的增强技术今后可能的研究方向包括以下两方面. (1)直方图特征点的提取和直方图曲线的拟合. 自然图像的直方图变化缓慢,找出某些特征点研究曲线的拟合是很好的前沿方向,对于数据存储量的降低以及直方图的直观展示很有利. (2)不重叠子块局部直方图均衡化与全局直方图均衡化方法的融合. 不重叠子块局部直方图均衡化结果更加侧重于图像局部细节的增强,算法实现很容易,但处理结果存在块效应;全局直方图均衡化处理结果自然,但会丢失细节,两者可以融合,可用于图像的细节增强.

参考文献

- [1] 章毓晋. 图像工程(上册):图像处理(3版)[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
ZHANG Yu-jin. Image Engineering(I):Image Processing (3rd edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 丁畅,董丽丽,许文海. “直方图”均衡化图像增强技术研

- 究综述[J]. 计算机工程与应用,2017,53(23):12-17.
DING Chang, DONG Li-li, XU Wen-hai. Review of “histogram” equalization technique for image enhancement [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53 (23):12-17. (in Chinese)
- [3] PARIHAR A S, VERMA O P, KHANNA C, et al. Fuzzy-Contextual contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4):1810-1819.
- [4] 梁琳,何卫平,雷蕾,等. 光照不均图像增强方法综述[J]. 计算机应用研究,2010,27(5):1625-1628.
LIANG Lin, HE Wei-ping, LEI Lei, et al. Survey on enhancement methods for non-uniform illumination image [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5):1625-1628. (in Chinese)
- [5] 何林远,毕笃彦,等. 基于亮度反馈的彩色雾霾增强算法[J]. 电子学报,2015,43(10):1978-1983.
HE Lin-yuan, BI Du-yan, et al. Color image haze removal algorithm based on luminance feedback[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10):1978-1983. (in Chinese)
- [6] 方帅,赵育坤,等. 基于光照估计的夜间图像去雾[J]. 电子学报,2016,44(11):2569-2575.
FANG Shuai, ZHAO Yu-kun, et al. Nighttime haze removal based on illumination estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11):2569-2575. (in Chinese)
- [7] KIM Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1):1-8.
- [8] WANG Y, CHEN Q, ZHANG B M. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equali-

- zation Method[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1):68-75.
- [9] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4):1310-1319.
- [10] 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.
- [11] SINGH K, VISHWAKARMA D K, et al. Contrast enhancement via texture region based histogram equalization [J]. Journal of Modern Optics, 2016, (15):1-7.
- [12] CELIK T, TJAHJADI T. Automatic image equalization and contrast enhancement using Gaussian mixture modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(1):145-156.
- [13] STARK J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5):889-896.
- [14] OOI C H, KONG N S P, IBRAHIM H. Bi-Histogram equalization with a plateau limit for digital image enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(4):2072-2080.
- [15] WANG Q, WARD R K. Fast image/video contrast enhancement based on weighted thresholded histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2):757-764.
- [16] LIANG K, MA Y, XIE Y, et al. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4):309-315.
- [17] 吴成茂. 可调直方图均衡化的正则解释及其改进 [J]. 电子学报, 2011, 39(6):1278-1284.
WU Cheng-mao. Regularization explanation of adjustable histogram equalization and its improvement [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6):1278-1284. (in Chinese)
- [18] WANG C, YE Z F. Brightness preserving histogram equalization with maximum entropy: a variational perspective [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4):1326-1334.
- [19] LIU B, JIN W Q, CHEN Y, et al. Contrast enhancement using non-overlapped sub-blocks and local histogram projection [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(2):583-588.
- [20] KIM J Y, KIM L S, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 1(4):475-484.
- [21] 丁畅, 董丽丽, 许文海. 图像梯度场双区间均衡化的细节增强 [J]. 电子学报, 2017, 45(5):1165-1174.
DING Chang, DONG Li-li, XU Wen-hai. Image details enhancement by gradient field bi-interval equalization [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5):1165-1174. (in Chinese)
- [22] 丁畅, 董丽丽, 许文海. 海面目标的红外景象增强技术研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(6):0610001.
DING Chang, DONG Li-li, XU Wen-hai. Enhancement technique for infrared scene with maritime target [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6):0610001. (in Chinese)
- [23] ZHAO W D, XU Z J, ZHAO J, et al. Infrared image detail enhancement based on the gradient field specification [J]. Applied Optics, 2014, 53(19):4141-4149.
- [24] KAUR A, SINGH C. Contrast enhancement for cephalometric images using wavelet-based modified adaptive histogram equalization [J]. Applied Soft Computing, 2017, 51:180-191.
- [25] AGAIAN S S, SILVER B, PANETTA K A. Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithm using contrast entropy [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3):741-758.

作者简介



董丽丽 女, 1980年11月出生于黑龙江七台河。2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位。现为大连海事大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像处理、光电信息与光电检测。

E-mail: 1147776326@qq.com



丁畅 (通信作者) 男, 1988年11月出生于黑龙江哈尔滨。2014年于大连海事大学获得硕士学位。现为大连海事大学信息科学技术学院博士研究生, 主要研究方向为图像处理、数据挖掘。

E-mail: longlongclinton@163.com



许文海 男, 1956年4月出生于吉林扶余。1991年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 1993年于东京工业大学获得博士学位。现为大连海事大学教授、博士生导师, 主要研究方向为图像处理、光电信息与光电检测。

E-mail: xuwenhai@dlnu.edu.cn