

# “直方图”均衡化图像增强技术研究综述

丁 畅,董丽丽,许文海

DING Chang, DONG Lili, XU Wenhai

大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026

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

**DING Chang, DONG Lili, XU Wenhai. Review of “histogram” equalization technique for image enhancement. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(23): 12-17.**

**Abstract:** Equalization is equal to uniform distribution, image enhancement algorithms directed by the equalization ideology have rich connotation, profound significance, wide application. Histogram Equalization(HE) is representative strongly in the field of image enhancement, on the basis, in recent years, researchers have expanded the applications of equalization ideology in the field of image enhancement. However, there is lack of the reviewing paper about HE for image enhancement which can comprehensively summarize HE related techniques, this paper considers the equalization ideology as the mainline, the improved work is classified into 5 kinds of techniques, meanwhile, the typical algorithms of each technique are analyzed, finally, the probable research directions in future are pointed out.

**Key words:** image enhancement; histogram equalization; sub-histogram equalization; histogram modification; variation technique; local histogram equalization; gradient domain; wavelet domain

**摘 要:**均衡化即等可能分布,以均衡化指导思想的图像增强方法内涵丰富,意义深远,应用广泛。直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)算法在图像增强中具有很强的代表性,近几年研究人员在此基础上又进一步拓展了均衡化思想在图像增强领域的应用。不过,目前缺乏针对直方图均衡化技术较为全面的综述评论性文章,以均衡化思想为主线,对于相关改进工作,分为五类技术,并分析了各类技术的典型算法,最后指出了今后可能的研究方向。

**关键词:**图像增强;直方图均衡化;子直方图均衡化;直方图修正;变分技术;局部直方图均衡化;梯度域;小波域

**文献标志码:**A **中图分类号:**TN911.73 **doi:**10.3778/j.issn.1002-8331.1710-0031

## 1 引言

直方图均衡化<sup>[1]</sup>(Histogram Equalization, HE)技术可以在图像增强<sup>[2]</sup>、光照补偿<sup>[3]</sup>、图像去雾<sup>[4-5]</sup>多个领域取得很好的效果,可见其应用范围广。许多关于图像增强算法的论文在结果对比中选取了HE算法,可见直方图均衡化技术代表性强。近三年内有很多研究人员致力于HE增强算法的研究及改进,国内外很多期刊都报道了HE增强算法的研究及改进工作,可见直方图均衡化技术关注度高、潜力大。同时直方图也是一幅图像的重要属性,可定量描述数据的统计特征,在图像工程中也有很重要的应用,如改进的灰度-局部方差二维直方图<sup>[6]</sup>

在图像分割中的应用,韦伯梯度方向直方图<sup>[7]</sup>在人脸识别上的应用,方向梯度直方图在目标检测中的应用<sup>[8]</sup>等。综合以上分析,对于直方图均衡化图像增强技术的回顾与总结至关重要。

## 2 关于经典HE算法的几点认识

关于直方图均衡化前后灰度值变化以及灰度值对比度变化的分析见文献[9],结合大量对经典HE算法的改进工作以及对HE相关算法的大量实践,本章中总结了HE经典算法的主要优缺点。

主要优点:经典HE算法本质为灰度级经某种变换,

**基金项目:**国家科技支撑计划课题(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)。

**作者简介:**丁畅(1988—),男,博士生,研究领域:图像处理,数据挖掘;董丽丽(1980—),女,通讯作者,博士,副教授,研究领域:图像处理,光电信息与光电检测, E-mail: 1147776326@qq.com;许文海(1956—),男,博士,教授,研究领域:图像处理,光电信息与光电检测。

**收稿日期:**2017-10-11 **修回日期:**2017-11-24 **文章编号:**1002-8331(2017)23-0012-06

使结果的灰度级的分布呈现近似均匀分布,其灰度值“均衡化”机制可在不同类别的图像都可以取得相对满意的对比度增强效果。

主要缺点:(1)经典HE算法总会引起大量灰度级合并,增强结果的局部区域细节下降,块状效应明显,背景和轮廓模糊等。(2)HE算法处理后的结果平均灰度值为固定值,存在一些局限性,会发生平均灰度值的迁移,不能满足电子类产品的增强需求。(3)经典HE算法灰度值映射函数单调不减,带来一些局限性,同时算法未考虑图像像素的空间位置和邻域信息,存在一些盲目性。

### 3 子直方图均衡化技术

双直方图及多直方图均衡化技术是首先选取合适的灰度值阈值将原图直方图分割成若干个子直方图,然后分别对子直方图进行均衡化,最后分别计算每个区间内的映射函数,得出增强之后的结果。基于此类技术提出的增强算法很多,且大多是为了做到保护原图亮度下的对比度增强,即增强结果与原图相比的AMBE尽可能小,而增强结果自身的信息熵与对比度尽可能增大,同时此项技术可有效解决经典HE算法灰度级个数减小和平均亮度迁移问题。该项技术可以大体上分为三类,第一类是双直方图均衡化技术,第二类是递归子直方图均衡化技术,第三类是动态直方图均衡化技术。

#### 3.1 双直方图均衡化技术

双直方图均衡化技术是将原始直方图分解为两段直方图,而后再将这两段直方图分别做均衡化处理。一般使用双直方图均衡化技术都是通过选取不同的阈值使增强结果达到某些特殊的效果,如增强结果有最大信息熵,与原图亮度更加接近等。该项技术以BBHE算法<sup>[10]</sup>,DSIHE算法<sup>[11]</sup>和MMBEBHE算法<sup>[12]</sup>为代表。BBHE算法的提出对于直方图分解技术属于开创性工作,MMBEBHE算法属于BBHE算法的改进,目的在于最大程度保持原图亮度,其增强效果通常会很好,该技术的流程图如图1所示。

近年来按照此类技术提出的算法都结合了图像分析,如BBPHE算法<sup>[13]</sup>将图像分成背景区域与目标区域,或是DOTHE算法<sup>[14]</sup>将图像分成纹理区域与平滑区域。仅对目标区域或者是纹理区域做均衡化处理可解决背景与目标模糊的问题。文献[14]较为具体地给出了图



图1 子直方图均衡化的图像增强技术流程图



图2 修正的直方图均衡化技术流程图

像显著性区域的计算方法。

#### 3.2 递归子直方图均衡化技术

递归子直方图均衡化技术是子直方图按照 $2^r$ 多次分解技术, $r$ 代表递归次数,利用前次得出子直方图的平均值或者中位数多次分解,随着递归次数的增多,其结果越来越接近原图的平均亮度。该技术代表性算法如RMSHE算法<sup>[15]</sup>和RSIHE算法<sup>[16]</sup>,该项技术的优点在于可调节递归次数,缺点为增强效果受参数制约过大,且随着 $r$ 的提高,对原图的增强效果变得不明显。近年提出的EDSHE算法<sup>[17]</sup>分析了上述的弊端,注重研究了子直方图区间范围的选取对结果的影响,并提出了按信息熵动态分解方法,其子直方图分解的个数可以不均匀,优势在于不用事先指定分解次数,整个算法无参数,但需以多次计算子直方图信息熵为代价。

#### 3.3 动态子直方图均衡化技术

动态子直方图均衡化技术主要考虑原图直方图的曲线分布情况,其分解的子直方图按曲线变化趋势确定,分解个数并不事先指定。一般来讲,自然图像灰度级频率前后变化不大,整体来看直方图的频率分布很接近于一个曲线,灰度级分布的这一特点为此类技术创造了条件。该技术的特点是充分考虑了原直方图的分布曲线的变化,根据曲线的上升和下降的趋势较为有针对性地选取合适的区域,比较典型的有DHE算法<sup>[18]</sup>和BPDHE算法<sup>[19]</sup>。

### 4 修正的直方图均衡化技术

修正的直方图均衡化技术主要对于原直方图的频率进行修正,因为HE增强结果的灰度级与灰度级对比度取决于该灰度级下的累积分布函数与灰度级的频率值,一般来讲,低频率的灰度级易发生灰度级的合并,高频率灰度级容易发生过度增强,这样可以对原直方图进行修正,用新直方图进行均衡化去间接控制增强结果。当前工作可归纳为直方图剪切技术与直方图频率加权技术,流程图如图2所示。

#### 4.1 直方图剪切技术

直方图剪切技术主要是对于某些高频率灰度级的限制技术,该项技术以BHEPL算法<sup>[20]</sup>为代表,若某些灰度级频率高于设定的阈值,则被设定的阈值取代,直方图重新做归一化,而后再将新直方图做均衡化处理,这样均衡化过程中对比度过度增强的问题可以避免,此项技

术形象地可称之为直方图剪切技术,直方图剪切技术在后来的应用中很广泛,许多新算法的提出都包含了直方图剪切技术,如MMSICHE算法<sup>[21]</sup>和ESIHE算法<sup>[22]</sup>同时应用了子直方图均衡化技术和直方图剪切技术。

#### 4.2 直方图频率加权技术

直方图频率加权技术注重HE算法的增强结果与灰度级频率的关系,通过调整原始频率,达到想要的效果,该技术的典型算法为WTHE算法<sup>[9]</sup>,采取了频率的阈值和频率调整技术,通过设定了两个高低阈值,对于频率较高的灰度级和频率较低的灰度级采取降低频率的方式,而对于介于两者之间的灰度级通过伽马校正来提高其频率值,且频率总和仍然为1,这样做一次均衡化得出的增强结果,比传统的HE算法结果视觉效果要好很多。WHE算法<sup>[23]</sup>将HE结果的灰度值与当前灰度值设定比例加权得出最终结果,使HE变化结果只占有一定比例,(该算法原理上与WONG等<sup>[24]</sup>提出的算法很接近,WONG等通过原图与HE结果加权来改善HE增强的效果),权重通过累积分布函数的变化程度来决定,WHE算法与WTHE算法相比在控制增强率方面更加直观,参数来源于图像的累积分布函数,实现了自适应,WTHE算法需要根据实验结果进一步调整,自动化程度不如WHE算法。

近年研究人员在直方图频率加权技术的改进主要为引入伽马函数来修正已有的累积分布函数,如AGCWD算法<sup>[25]</sup>,IEAGCCH算法<sup>[26]</sup>在AGCWD算法基础上做出改进,采用了几组不同的伽马函数参数对累积分布函数做出局部修正,增强效果更好,该技术各个算法的共同特点在于均衡化处理次数只有一次。

#### 5 基于直方图变分规定化的图像增强技术

直方图变分技术是一种将图像处理理论与最优化理论、泛函分析相结合的方法。该项技术将目标直方图作为目标函数,按照图像处理理论令目标函数达到某些要求,然后用最优化方法求出该函数的解,最后按照直方图规定化<sup>[1]</sup>(HS)规则计算出灰度级映射函数,得出增强结果。此类技术的特点为事先不考虑原直方图的频率分布,只需按照所设定的条件求解出目标直方图,不过在最优化的过程中涉及到的数学计算一般会很复杂,此类技术相关算法很少,该项技术的流程图如图3所示。



图3 基于直方图变分规定化的图像增强技术流程图



图4 局部均衡化技术流程图

BPHEME算法<sup>[27]</sup>为此项技术的典型算法。该算法目的在于借鉴变分的观点,利用直方图规定化的手段使增强结果在保持原图亮度的同时,有最大信息熵,该算法将直方图频率总和为1与平均亮度与原图相同设定为约束条件,将信息熵最大设定为目标函数,然后求取该泛函的极大值并计算出目标直方图函数,最后按照HS的数值映射准则求出灰度值的转换函数,得出算法结果。该算法的实验结果在保护亮度方面比MMBEBHE要好,同时可以做到保留原图局部的细节但计算的复杂程度要比MMBEBHE算法高很多。

#### 6 局部直方图均衡化的图像增强技术

局部直方图均衡化技术(如图4)(Local Histogram Equalization)针对于经典HE算法局部细节退化的问题提出,该技术主要对原图像在空间上的分为若干个子块(各子块之间可以重叠),每块做均衡化处理,这样结果更加倾向于图像局部区域的灰度值分布,算法的优点主要表现在图像局部细节的提升特别有效,该类技术的特点为均衡化过程易实现,关键在于如何避免块效应。LHE算法结果依赖于子块的选取与子块的移动方式,因此该算法的研究关键技术在于图像子块的选取及移动。根据块选取方式的不同可分为不重叠子块,重叠子块和部分重叠子块,不重叠子块对于各块的均衡化次数很少,但块效应的问题十分明显,研究重点在于采取有效的方法避免很明显的块效应;重叠子块计算次数过多,且很多计算都无意义,程序运行时间过长,对于这种方式很少使用;部分重叠子块的局部均衡化技术计算次数少,增强结果较为理想且块效应容易避免,基于此类技术的研究工作很多。

POSHE算法<sup>[28]</sup>是部分重叠子块局部均衡化技术最为典型的算法,该算法采用了子块部分重叠的方式,该算法对于图像细节的增强十分有效,部分均衡化之后的结果会有少许块状效应出现,文中提出了用均值滤波器查找并消除块效应的方法(BERF)。ABMHE算法<sup>[29]</sup>是基于POSHE算法的改进,主要用于红外图像的细节增强,该算法根据图像梯度值数值大小的比例,事先认定图像的活跃区域,不活跃区域和一般区域,较为有针对性地在图像中选中局部区域,而后进行局部均衡化,算法的细节增强效果比POSHE算法要好,但需要增加图像区域的先验计算过程。CMBFHE算法<sup>[30]</sup>在POSHE算

法的基础上构建级联滤波器来消除块状效应,算法的效率比POSHE算法高很多,且计算复杂度明显减少。

LIU等<sup>[31]</sup>在子块不重叠基础上提出一种“直方图灰度级个数保护机制”的局部均衡化方法,图像分为若干子块后,子块内的直方图分布特点为占有的灰度级个数很少,且灰度级通常在一小段范围,这样均衡化机制可以做适当改变,经典HE转换函数主要取决于灰度级的累积个数,LIU等建议局部均衡化转换函数为非零频率灰度级个数的累积,这样做到了直方图非零频率灰度级个数的保护(整个图像均衡化处理下不宜采用这种机制计算灰度级转换函数,因为一幅图像的直方图分布通常占据所有灰度级)。在消除块效应的措施上,考虑的是邻近四块该灰度级映射结果的加权,权重设置考虑了像素点在当前块的空间位置,可很好地消除块效应,相对于POSHE算法的均衡化次数可得到很大程度上的缩减,但在权重的求取方面需要对图像整体像素点全部遍历,这就需要额外的计算量。

## 7 基于变换域均衡化的图像增强技术

基于变换域均衡化的图像增强技术,主要包括梯度域均衡化的图像增强技术和小波域均衡化的图像增强技术。图像梯度域类似于图像频率域,主要反映了图像的细节信息,将直方图均衡化或规定化方法引入梯度域可以使图像细节均匀地体现,对于图像的细节增强特别有效,这项技术涉及到的复原过程也是难点,该项技术的流程图如图5所示。小波域均衡化指通过二维离散小波变换将图像变换至小波域,通过均衡化小波系数,并完成重构得出最终结果,该项技术的流程图如图6所示。

文献[32]针对于许多受光照影响较大图像纹理细节消失的问题,提出了梯度场均衡化的图像增强方法,文中指出细节消失的图像主要原因在于梯度没有得到有效的放大,采取梯度域均衡化方法可以将梯度值在不同的灰度级等可能地展现出来,达到图像细节增强的效果。对于图像新梯度场的建立要保持原有方向不变,新梯度值为根据HE规则映射后的梯度值,最后利用最小二乘法对目标梯度场的复原可以重建出增强结果。更进一步,文献[33]注意到了梯度场幅值直方图偏态的分布特性,将双直方图均衡化方法引入梯度域,在梯度场

复原过程中又提出了矩阵变换法。ZHAO等<sup>[34]</sup>提出了一种基于梯度场规定化的图像增强方法,针对于红外图像细节不突出问题,主要采取利用双峰高斯函数与原梯度幅值直方图加权的方式建立目标梯度幅值直方图,这样做的目的是扩展梯度直方图的动态范围,而后利用HS规则计算变换后的梯度值,构造目标梯度场,从而重建出增强结果,该算法为梯度域直方图规定化技术较为典型的方法。

小波域均衡化方法主要通过均衡化小波系数来完成。一般来说,图像的边缘、噪声、细节对应于小波变换后的高频系数,图像的整体轮廓对应于小波变换后的低频系数,此类技术一般只对低频系数做均衡化处理,若对于高频系数做均衡化常会出现过度增强或噪声显著的问题,如文献[35]提出的小波域分段均衡化方法,可很好地增强医学图像。另外,小波域变换更能考虑图像的局部特性,经典HE算法的结果造成的局部细节的丢失,可通过小波变换的方法加以弥补<sup>[36]</sup>。

## 8 总结与展望

本文将以上五类技术的逻辑思路,技术特点,适用场景,增强效果,评价指标的选取以及运算成本方面的总结归结为表1。本文标题中“直方图”加注引号,指更为广义的概念,因为描述图像中具有统计意义量的频率都可以称之为直方图。同时,本文认为关于直方图及直方图均衡化技术今后可能的研究方向如以下几点:

(1)自然图像直方图的变化规律十分接近于某一曲线,这样可研究制定一些准则找出直方图频率分布的某些特征点来刻画或拟合直方图曲线,就可以很直观地反映直方图频率的变化,这可以使子直方图均衡化阈值的选取更加准确。

(2)研究HE过程中灰度级发生合并的条件。目前灰度级频率越低在HE过程中越容易发生灰度级的合并,尚无准确的数学描述,如给出HE过程中灰度级发生合并的条件,可很好地推进修正的直方图均衡化技术的发展。

(3)对于不重叠子块局部均衡化技术关键在于如何消除较为明显的块状效应,可考虑图像整体HE算法和局部区域HE算法结合的方式来制定更为有效的算法,因为整体HE灰度值变化考虑图像整体灰度值的分布,

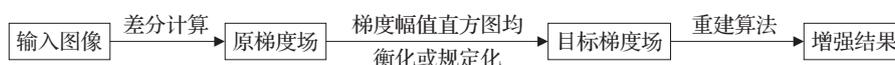


图5 基于梯度域均衡化和规定化的图像增强技术

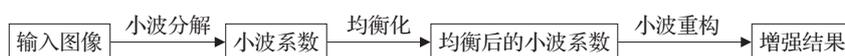


图6 基于小波域均衡化的图像增强技术

表1 基于HE方法的各种改进技术总结

均衡化技术类别	逻辑思路	技术特点	适用场景	增强效果	评价指标的选取	运算成本	
子直方图均衡化技术	在直方图选取合适的阈值,按灰度级范围划定区间,分别进行均衡化处理。此类技术的难点在于阈值的选取	阈值一般参照直方图变化规律等特点选取,实现了灰度值在指定范围内的均衡化	亮度保护下的图像对比度增强,满足消费类电子产品的增强需求,一般不能用于图像细节的丰富	同上	此类技术在保护原图亮度的基础上,对比度得到增强。一般来讲,增强结果的灰度级个数一般比原图少	宜采用有参考评价指标(PSNR或AMBE)与无参考评价指标(EME或信息熵等)联合评价。如PSNR越小,EME <sup>[37]</sup> 越大,大算结果越理想	前期阈值的选取需要大量分析及计算,均衡化次数通常需要几次
修正的直方图均衡化技术	通过修正直方图频率值或修正累积分布函数的方式间接控制算法结果的增强程度。此类技术的难点在于修正的方法	对原直方图频率或对累积分布函数进行修正,均衡化次数一般只有一次	同上	同上(图像结果的亮度与对比度通过参数较为容易调整)	同上	前期的自适应参数选取需要计算,均衡化次数只需一次	
直方图变分规定化技术	首先设定目标直方图,按照某些约束条件或达到某种目的来计算直方图,最后利用直方图规定化的方法来计算增强结果	预先指定增强结果的目标直方图,对于原始直方图不用过多考虑,且最后根据目标直方图做出灰度级变换	同上	该算法结果在保护原图平均亮度方面要好,且信息熵会得到提高	同上	目标直方图的计算过程很复杂,后续需要一次直方图规定化的计算	
局部直方图均衡化技术	按图像空间位置,将图像分块,各块分别均衡化,最后采取相应措施消除块效应。此类技术难点在于块效应的消除	针对于不同空间位置区域做局部均衡化处理,充分考虑图像局部信息	图像细节增强(尤其是局部细节增强),梯度域规定化方法对于红外图像的细节增强也非常有效	图像细节会明显变丰富(灰度级个数会变得丰富,信息量增加),但是平均亮度通常会发生变化	宜采用无参考图像质量评价,如EME,平均梯度,信息熵。指标值越大则图像细节越丰富	均衡化次数通常会很多,但一般涉及到的阈值和参数少	
基于变换域均衡化技术	将图像空间域变换至其他域,如梯度域或小波域,然后应用直方图均衡化或规定化方法。此类技术的难点在于变换域的复原	在变换域内采用均衡化方法	图像细节增强(梯度域规定化可用于红外图像的细节增强,小波域均衡化还可用于医学影像增强)	同上	同上	该技术在变换域到时域的转换过程,一般用到最小二乘法,或制定有效的算法实现,这部分涉及的计算一般较复杂	

可在此变化的基础上结合局部分布特点做相应的微调,可能会取得较为理想的增强效果。同时对于局部均衡化技术子块的选取形状不一定是严格方形,任意形状的子块对于图像纹理区域或平滑区域的划定更有针对性。

### 参考文献:

- [1] 章毓晋. 图像处理[M]. 3版. 北京:清华大学出版社, 2012.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 何林远, 毕笃彦, 熊磊, 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.
- [5] 方帅, 赵育坤, 李心科, 等. 基于光照估计的夜间图像去雾[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2569-2575.
- [6] 杨恢先, 颜微, 谭正华, 等. 改进的灰度-局部方差二维直方图图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(4): 209-213.
- [7] 杨恢先, 唐金鑫, 陶霞, 等. 基于韦伯梯度方向直方图的人脸识别算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(15): 200-205.
- [8] 刘方园, 王水花, 张煜东. 方向梯度直方图综述[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(19): 1-7.
- [9] 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.
- [10] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1-8.
- [11] Wang Y, Chen Q, Zhang B M. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.
- [12] 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.
- [13] Tan T L, Sim K S, Tso C P. Image enhancement using background brightness preserving histogram equalisation[J]. Electronics Letters, 2012, 48(3): 155-157.
- [14] Singh K, Vishwakarma D K, Walia G S, et al. Contrast enhancement via texture region based histogram equalization[J]. Journal of Modern Optics, 2016(15): 1-7.
- [15] 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.
- [16] Sim K S, Tso C P, Tan Y Y. Recursive sub-image histogram equalization applied to gray scale images[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(10): 1209-1221.
- [17] Parihar A S, Verma O P. Contrast enhancement using entropy-based dynamic sub-histogram equalisation[J]. IET Image Processing, 2016, 10(11): 799-808.
- [18] Wadud M A A, Kabir M H, Dewan M A A, et al. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 593-600.
- [19] Ibrahim H, Kong N S P. Brightness preserving dynamic histogram equalization for image contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1752-1758.
- [20] 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.
- [21] Singh K, Kapoor R. Image enhancement via median-mean based sub-image-clipped histogram equalization[J]. Optik, 2014, 124(17): 4646-4651.
- [22] Singh K, Kapoor R. Image enhancement using exposure based sub image histogram equalization[J]. Pattern Recognition Letters, 2014, 36(1): 10-14.
- [23] Yun S H, Kim J H, Kim S. Contrast enhancement using a weighted histogram equalization[C]//2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2011: 203-204.
- [24] Wong C Y, Liu S L, Liu S C, et al. Image contrast enhancement using histogram equalization with maximum intensity coverage[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(16): 1618-1629.
- [25] Huang S C, Cheng F C, Chiu Y S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(3): 1032-1041.
- [26] Huang Z H, Zhang T X, Li Q, et al. Adaptive gamma correction based on cumulative histogram for enhancing near-infrared images[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 79: 205-215.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Wang Y, Pan Z B. Image contrast enhancement using adjacent-blocks-based modification for local histogram equalization[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 86: 59-65.
- [30] Lamberti F, Montrucchio B, Sanna A. CMBFHE: a novel contrast enhancement technique based on cascaded multistep binomial filtering histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, 52(3): 966-974.
- [31] 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.
- [32] 朱立新,王平安,夏德深.基于梯度场均衡化的图像对比度增强[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(12):1546-1552.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Kaur A, Singh C. Contrast enhancement for cephalometric images using wavelet-based modified adaptive histogram equalization[J]. Applied Soft Computing, 2017, 51: 180-191.
- [36] Fu J C, Lien H C, Wong S T C. Wavelet-based histogram equalization enhancement of gastric sonogram images[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2000, 24(2): 59-68.
- [37] 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.