

图像梯度场双区间均衡化的细节增强

丁 畅,董丽丽,许文海

(大连海事大学信息科学技术学院,辽宁大连 116026)

摘 要: 直方图均衡化技术已广泛地应用于图像增强中,本文将该方法引入梯度域,这样可以使图像细节均匀地分布在各灰度级上. 进一步本文又研究了图像梯度幅值分布特点,根据梯度幅值的右偏分布特性,采取双区间分别对梯度场进行均衡化处理. 在区间阈值选取上,本文结合频率分布的数字特征,提出了区间阈值的两个选取准则并将梯度幅值合理地分为小梯度区间和大梯度区间. 在目标梯度场复原过程中,本文提出矩阵变换法替代传统的“微分迭代法”,减小了算法的时间复杂度. 实验结果表明本文算法可使图像细节得到有效地增强.

关键词: 图像增强; 梯度场; 直方图均衡化; 双区间; 梯度幅值直方图; 偏度系数

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)05-1165-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.020

Image Details Enhancement by Gradient Field Bi-interval Equalization

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

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

Abstract: The technique of histogram equalization (HE) is widely used in the field of image enhancement, the method is introduced into the gradient field in this paper, so image details are distributed in each gray level uniformly. Moreover, the characteristics of the histogram of gradient magnitude are studied, according to the right-skewed distribution of gradient magnitude, the gradient field is equalized by two intervals. In terms of the threshold's selection, numerical characteristics of frequency distribution are considered, two standards of the interval threshold are proposed, which can divide the gradient magnitude into the interval with low magnitude and the interval with high magnitude. On the process of the reconstruction of target gradient field, matrix transform method is proposed, which substitutes the traditional method "difference and iteration method", the proposed method can decrease the algorithm's time complexity. The experimental results show that the method this paper proposed can make image details enhance effectively.

Key words: image enhancement; gradient field; histogram equalization; bi-interval; the histogram of gradient magnitude; skewness

1 引言

直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)^[1]是图像增强中常用的方法之一,该技术使增强后的图像像素点近似均匀地分布于不同的灰度级上,它的优点在于算法简单、增强效果明显等,但该算法会使原图像小概率的灰度级被合并这样会导致这些区域的对比度会明显降低. 针对这样的缺点,近年来许多学者在传统直方图均衡化方法的基础上提出了很多改进算法^[2-6],大多通过设定阈值,增加不同灰度级的权重得到比传统直方图均衡化更为广义的模型,从而取得更好的增强效果. 如 STARK^[2]在直方图均衡化过程引入了自适应技术(Adaptive Histogram Equalization, AHE), WANG

等^[3]在直方图均衡化过程引入了阈值和加权技术(Weighted Thresholded Histogram Equalization, WTHE), 江巨浪等^[6]提出保持图像亮度的局部直方图均衡算法.

图像梯度^[7,8]是一幅图像的重要属性,可以很好地描述一幅图像的特征信息,近年来许多学者提出了基于梯度域的图像增强方法^[9-12],该方法通过改变原梯度场幅值的大小,保留原梯度场方向不变完成对原图梯度场的处理建立目标梯度场,最后通过梯度域的复原算法来得出增强后的结果. 总结起来,基于图像梯度域处理的增强方法大致可分为如下三个步骤:①计算出图像的原梯度场;②根据需要调整原梯度场得到目标梯度场;③根据某种重构算法从目标梯度场中重构增强后的结果. 本文在步骤②中将直方图均衡化技术

从空间域引入梯度域,对图像的梯度场做均衡化处理可以将图像的细节均匀地展现在不同的灰度级上,从而达到图像细节增强的目的;在步骤③中提出了基于矩阵变换的梯度场复原方法取代传统的“微分迭代法”,在很大程度上简化了计算过程。

不同图像的直方图千差万别,毫无规律可言,但不同图像的梯度场分布(梯度幅值直方图)有很强的共性,都表现为梯度值小的像素点所占比例大,梯度值大的像素点所占比例小的特点^[10],统计学中采用偏度系数^[13]描述分布偏离对称性的程度的一个特征数,偏态分布常有不对称的两个尾部,重尾在右侧(变量在高值处比低值处有较大的偏离中心趋势)会导致偏度系数大于0.图像梯度场分布特点总会使其偏度系数大于0.对此,国内外很多学者致力于对图像梯度场分布建立连续的数学模型^[14,15],以此探索新的图像处理技术.如蔡岭等^[14]利用 Gamma 混合分布拟合整个梯度场分布. SEN 等^[15]证明图像梯度幅值在整体上近似服从莱斯分布,如果将一幅图像分为非边缘区域(非边缘点所组成的集合)和边缘区域(边缘点所组成的集合),那么在非边缘区域内梯度幅值近似服从混合瑞利分布,在边缘区域内梯度幅值近似服从混合高斯分布。

本文充分考虑图像梯度场分布特点,在梯度场均衡化^[12](Gradient Field Equalization, GFE)的基础上更进一步地提出了对梯度场实行双区间均衡化的算法(Gradient Field Bi-Interval Equalization, GFBE),双区间均衡化的主要过程是选取合适的阈值将梯度场分成两个不同的子区间,两个子区间分别表示小梯度区间和大梯度区间,然后分别求取这两个子区间的直方图,最后分别对两个子区间做直方图均衡化处理.采取以上操作主要有以下两个优点:

(1)从映射后的灰度级方面,如做全局直方图均衡化处理,根据梯度幅值直方图的特点,必将导致大量原本过小的梯度值迁移至大梯度范围内,重建出的结果往往有过增强的现象.若采取分区间操作,阈值起到截断作用,两区间的数据不交换,只在所属区间内均衡,可以避免过度增强现象。

(2)从映射后的灰度级对比度方面,直方图均衡化之后的灰度级对比度取决于原灰度级的比例,如做全局直方图均衡化处理,大梯度的比例原本就很小,这样操作必将导致过多大灰度级被“吞噬”^[4].如采取分区间操作,可以提高均衡化的灰度级的对比度,有效削弱灰度级的“吞噬”。

其他增强技术包括基于 Retinex 理论的图像增强^[16]和暗通道算法^[17,18]两大类. Retinex 理论由 LAND 等^[16]提出,主要用于图像光照补偿中;暗通道算法由 HE 等^[17]提出,主要用于图像去雾中. Retinex 算法的结

果将在第五节中与本文算法的增强结果做比较。

2 图像梯度场分布

图像的梯度是图像处理和图像分析中的主要研究对象.在图像处理的各类偏微分方程模型中,很多是以图像的梯度作为关键的依据^[19,20].图像梯度幅值的计算方法如式(1),式(1)中偏导数采取一阶中心差分格式^[7]计算,图像中各点按照式(1)计算得出梯度幅值图,式(1)中 I 表示原图, $|\nabla I|$ 为梯度幅值图,统计梯度幅值图灰度比例,做出梯度幅值直方图,本文选取 256 个灰度级(灰度值范围 0 ~ 255),绘出梯度幅值直方图,这种选取方法可以做到信息量不丢失^[1],准确描述图像梯度幅值分布。

$$|\nabla I| = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

图 1(b)、图 2(b)、图 3(b)分别为图 1(a)、图 2(a)、图 3(a)的直方图;图 1(d)、图 2(d)、图 3(d)分别为图 1(c)、图 2(c)、图 3(c)的梯度幅值直方图.如引言中所述,三幅图像直方图相差迥异,但梯度幅值直方图表现为很强的共性,其特点为梯度值小的像素点所占比例大,梯度值大的像素点所占比例小。

统计学中的偏度系数^[13]反映分布偏离对称性程度的特征,偏度系数的计算公式如式(2)所示,式(2)中 ν_3 表示三阶样本中心矩^[13], ν_2 表示二阶样本中心矩^[13].将三幅图像梯度幅值作为样本数据代入式(2)分别计算它们的偏度系数,经计算图 1(c)的偏度系数为 1.25,图 2(c)的偏度系数为 1.45,图 3(c)的偏度系数为 2.10.偏度系数反映分布偏离对称性的程度.若 $\beta_s > 0$ 分布右偏^[13],以上通过定量分析表明梯度幅值直方图右偏分布非常明显。

$$\beta_s = \frac{\nu_3}{\nu_2^{3/2}} = \frac{E(X-EX)^3}{[\text{Var}(X)]^{3/2}} \quad (2)$$

关于梯度幅值直方图测定,我们从观察分布规律和计算偏度系数两个方面测试了公共数据集的所有图像,被测图像大约为 50 幅且涵盖各个类别,其梯度幅值直方图的分布特点全部如上所述,限于篇幅仅列出待增强三幅图像的直方图以及梯度幅值直方图。

3 梯度场双区间均衡化

3.1 区间截断阈值的选取

小梯度值和大梯度值只是针对某一具体图像的“小”和“大”,无法利用统一的数值进行规定,考虑到梯度幅值直方图等同于统计学中的频率分布,这样可以应用统计学的一些数字特征来完成区间阈值的选取.对此,本文提供两个准则完成区间阈值的确定,应用这两个准则求出的区间阈值在数值上相差不大,不会给增强结果带来过大的改变。

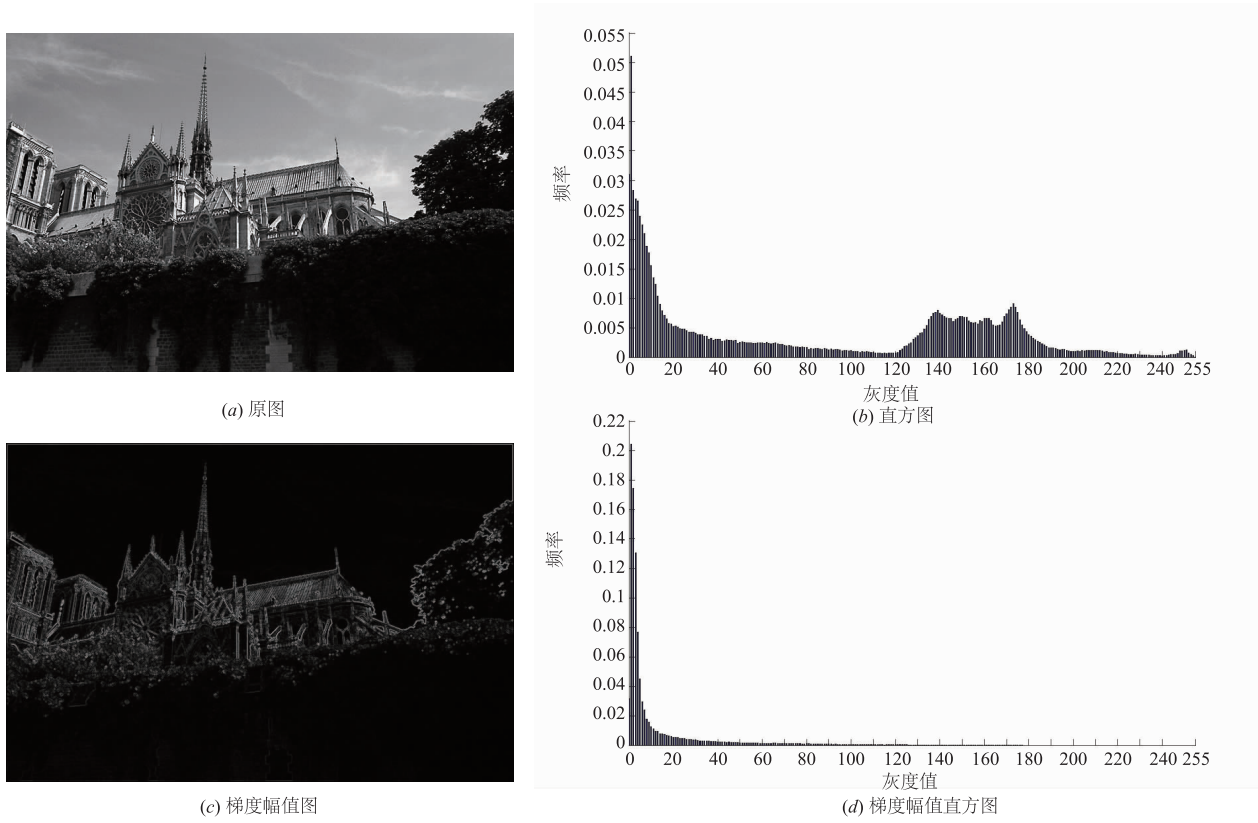


图1 建筑物图像的直方图与梯度幅值直方图

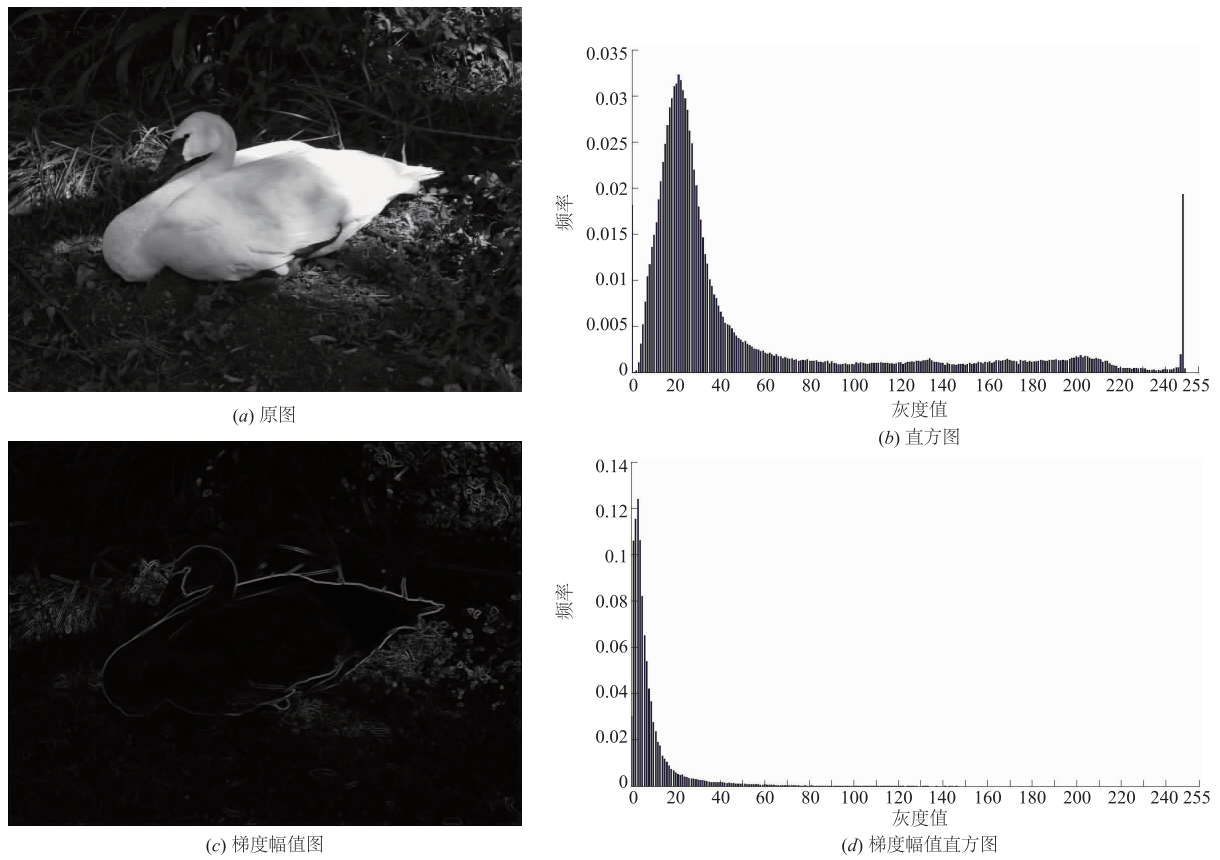


图2 动物图像的直方图与梯度幅值直方图

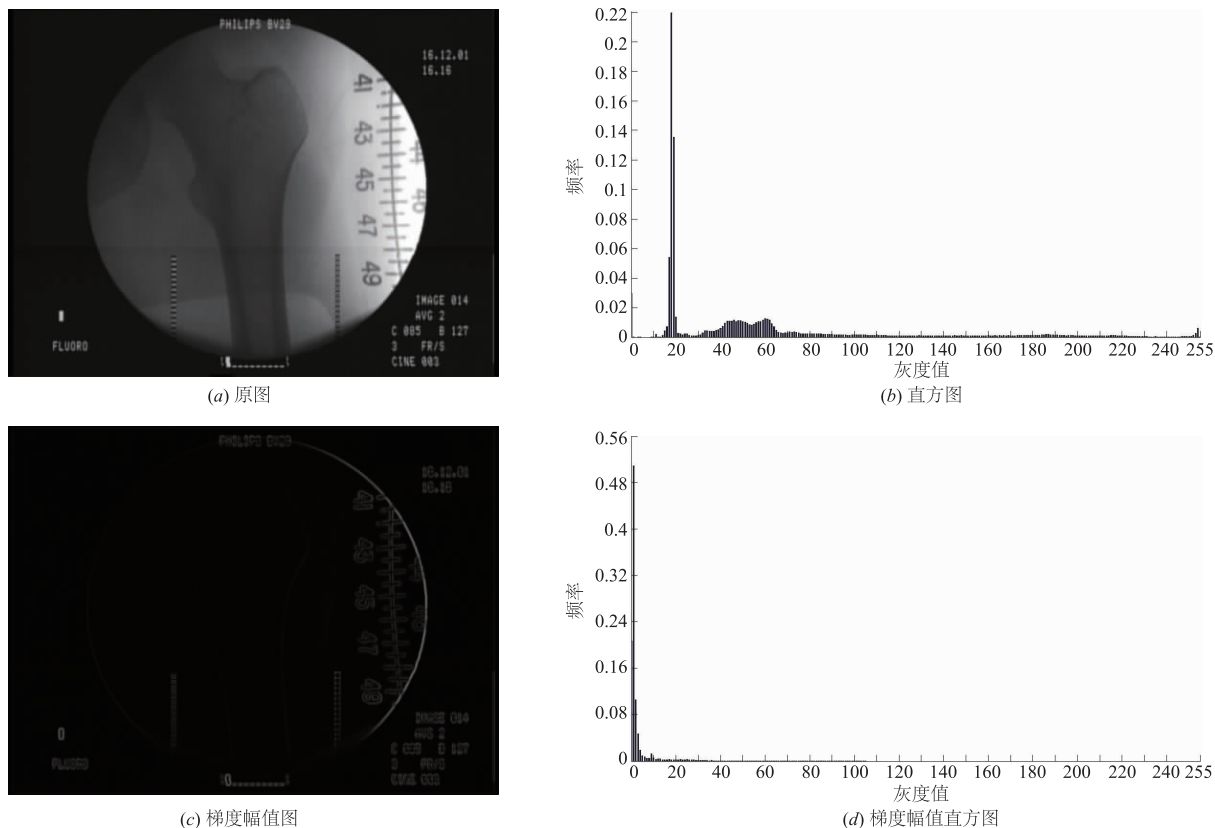


图3 医学图像的直方图与梯度幅值直方图

第一个区间阈值选取准则是采用统计学中的下侧分位数^[13],即累积当前梯度幅值所占比例,在0.75~0.8范围内(下侧0.75~0.8分位数)即截止,将此作为区间阈值.这条准则充分考虑到图像梯度幅值直方图呈现右偏分布的特点,累积分布函数取值如果在0.75~0.8范围内,此时这部分区间可以代表图像小梯度值的区间(图像梯度的客观规律为小梯度值所占比例大,大梯度值所占比例小),其余的0.25~0.2范围内的区间可以代表图像大梯度值的区间,这样就可以将整个梯度场合理地分为小梯度区间和大梯度区间.虽然对众多图像,无法通过统一的数值指定其梯度幅值的“小”与“大”,但作为统计百分比0.75~0.8这个范围内的数值完全可以代表大多数,0.25~0.2范围内的数值完全可以代表少数.按照此方法计算出图1(d)、图2(d)、图3(d)的阈值分别为 $Th_1 = 10$; $Th_2 = 9$; $Th_3 = 2$ (本文后续说明和实验的区间阈值按此数值选取).如计算结果所示,像图1(d)略显“宽胖”型的梯度幅值分布,梯度幅值小于10即为小梯度值,像图3(d)“窄瘦”型的梯度幅值分布,梯度幅值需要小于2才算小梯度值.

第二个区间阈值选取准则是采用统计学中的偏度系数^[13]并借鉴文献[15]的观点和结论,文献[15]从梯度角度研究图像边缘检测的阈值选取方法,同时将图像分成两个区域,一个是非边缘区域(图像非边缘点组成的集

合),非边缘区域梯度值都很小,本文将其作为小梯度值区间,另一个是边缘区域(图像边缘点组成的集合),边缘区域梯度值都很大,本文将其作为大梯度值区间. SEN等^[15]利用随机过程中的相关理论证明了图像非边缘区域的梯度幅值近似服从混合瑞利分布,图像边缘区域的梯度幅值近似服从混合高斯分布,混合瑞利分布的一个显著特点是其偏度系数为固定值0.63^[13],而在大量样本数据中计算偏度系数比测定其分布规律容易得多,因此本文可以采取测定区间的偏度系数方法来确定区间阈值.对于小梯度值区间而言,它的范围必在 $[0, Th]$ 内,其左侧端点值必为0(一幅图像必存在梯度幅值为0的像点),右侧端点 Th 为区间阈值,本文研究了 Th 从0到梯度最大值 $\max(|\nabla I|)$,梯度值在 $[0, Th]$ 内样本数据的偏度系数随 Th 的变化,结果表明偏度系数是关于 Th 的单调递增的单值函数,文献[15]同样有类似的结论,这样只要截取偏度系数为0.63时的 Th 作为合理阈值即可.按照此方法计算出图1(d)、图2(d)、图3(d)的阈值分别为 $Th_1 = 11$; $Th_2 = 8$; $Th_3 = 2$.

3.2 双区间均衡化

对图像梯度场进行双区间均衡化从原理上可以使图像在小梯度区间的细节和大梯度区间的细节均匀地分布在各自所属区间的灰度级上,这是对图像细节增强的有效方法.引言中从映射后的灰度级和映射后的

灰度级对比度两个方面论述了本文对图像梯度场采取双区间均衡化方法的主要优点, 根据图像梯度幅值直方图的特点, 又分析了对图像梯度幅值直方图采取全局均衡化操作的不足之处.

设定区间阈值 Th 将整个梯度场分为两个不同的区间, 分别为区间 I 和区间 II, 区间 I 的梯度幅值范围为 $[0, Th]$, 区间 II 的梯度幅值范围为 $(Th, \max |\nabla I|]$. 目标梯度场幅值的数学表达式如式(3)所示, 式(3)中 I_1 为区间 I 中的原梯度值, I_2 为区间 II 中的原梯度值. \bar{I}_1 为区间均衡化之后的新梯度值, \bar{I}_2 为区间均衡化之后的新梯度值. $n(I_1)$ 表示在区间 I 中梯度值小于等于 I_1 的像素个数, $n(I_2)$ 表示区间 II 中梯度值大于 Th 且小于等于 I_2 的像素个数. N_1 和 N_2 分别表示区间 I 和区间 II 包含的像素总数.

$$\bar{I}_1 = Th \times \frac{n(I_1)}{N_1} \quad (3)$$

$$\bar{I}_2 = Th + (\max |\nabla u| - Th) \times \frac{n(I_2)}{N_2}$$

将 \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 合成新的 \bar{I} 组成目标梯度场的幅值, 保留原梯度场的方向信息不变, 建立目标梯度场, 目标梯度场的数学表达式如式(4)所示. 式(4)中 \tilde{G} 表示目标梯度场, 为一矢量, 包含 x 和 y 两方面的信息, 在程序中可以用两个矩阵存储.

$$\tilde{G} = \frac{\nabla I}{|\nabla I|} \cdot \bar{I} \quad (4)$$

从图 4 ~ 图 6 中可以看出, 原梯度场经过双区间均衡化之后, 梯度幅值图的细节信息更加丰富, 图 6(d) 的效果则更为明显.

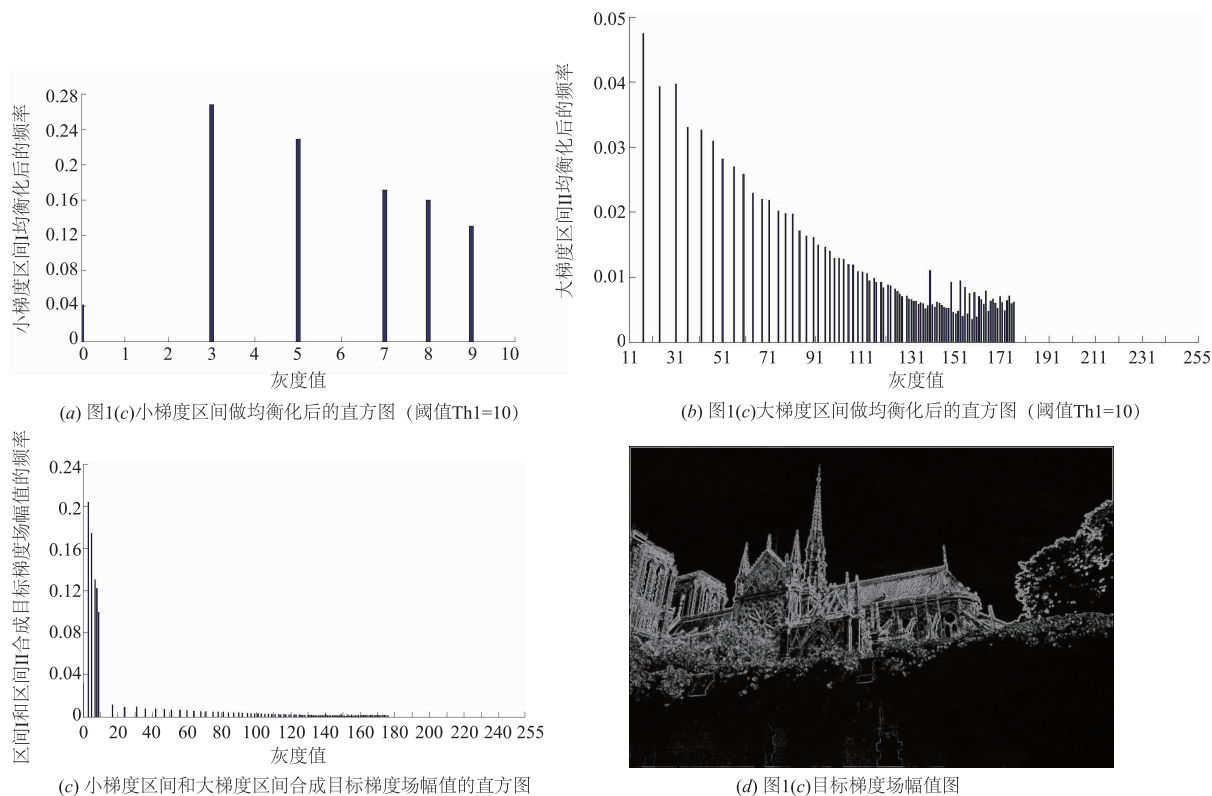


图4 建筑物图像的目标梯度场幅值图及其直方图

4 目标梯度场的数值重建

得出目标梯度场之后, 需要按照目标梯度场重建出增强之后的结果, 等价于寻找一幅新的图像, 使此图像的梯度场等于目标梯度场. 对此, 可以通过最小化式(5)的泛函来完成目标梯度场的重建^[10]. 式(5)中的 \tilde{G} 表示目标梯度场, ∇ 为梯度算子, 式(5)泛函取最小值时的 u 为重建出的结果.

$$E(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u - \tilde{G}| dx dy \quad (5)$$

依据变分法^[21], 最小化式(5)等价于求解如下的 Poisson 方程^[7].

$$\Delta u = \operatorname{div}(\tilde{G}) \quad (6)$$

式(6)中的 Δ 为拉普拉斯算子, \tilde{G} 为目标梯度场, u 为重建结果. 针对式(6)许多学者采取传统的“微分迭代法”完成求解. 微分迭代法主要包括设定初始值和循环迭代两部分, 式(7)为微分迭代法的主要数学模型. 对于初始值设定一般为原图像, 经过多次迭代直至 u 稳定后便得到式(6)的解. 迭代过程过多会极大地提高算法的时间复杂度, 对计算机内存造成极大的开销. 本

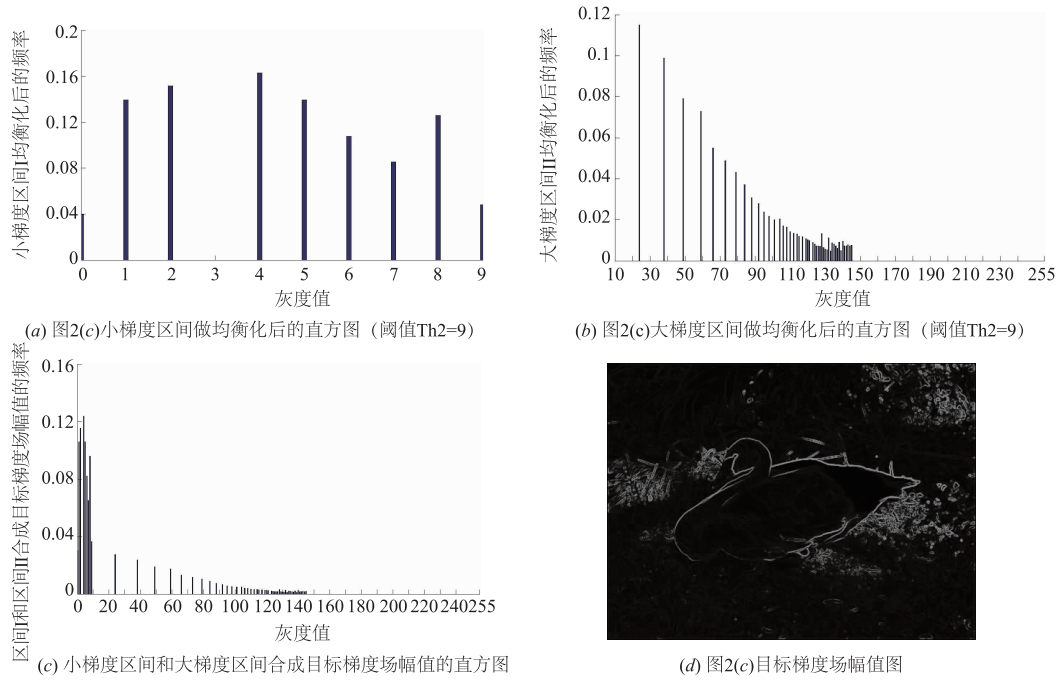


图5 动物图像的目标梯度场幅值图及其直方图

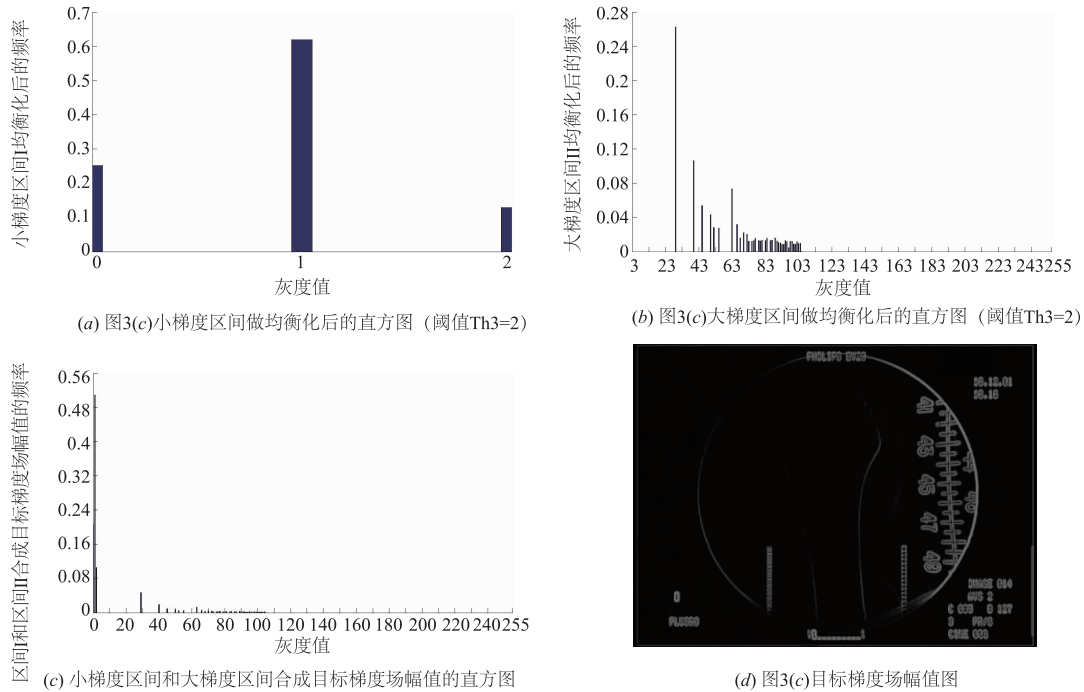


图6 医学图像的目标梯度场幅值图及其直方图

文将拉普拉斯算子对于图像的滤波^[1]等效成两个矩阵对图像矩阵的乘积而后相加的操作,如式(8),再将散度算子^[7]数值离散化为一个矩阵C,如式(9),于是式(6)的 Poisson 方程等价为一矩阵方程如式(10).

$$\begin{cases} u_{(t=0)} = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u - \text{div } \tilde{G} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta u \xrightarrow{\text{数值离散}} A_{m \times m} X_{m \times n} + X_{m \times n} B_{n \times n} \quad (8)$$

$$\text{div}(\tilde{G}) \xrightarrow{\text{数值离散}} C_{m \times m} \quad (9)$$

$$A_{m \times m} X_{m \times n} + X_{m \times n} B_{n \times n} = C_{m \times m} \quad (10)$$

$$A, B = \begin{pmatrix} -2 & 1 & & & \\ 1 & -2 & 1 & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & & 1 & -2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式(8)中的 X 为目标梯度场重建出的图像矩阵, 图像(矩阵)的大小为 $m * n$, A, B 两个矩阵为乘积矩阵, 两矩阵元素的排列规律相同, 如式(11), 大小分别为 $m * m$ 和 $n * n$. A, B 两矩阵的特征值互异且全部为负, 该矩阵可对角化, 本文提出矩阵变换的方法完成了式(6)的求解. 具体解法如下:

Step1 将 A, B 矩阵对角化为 A_A, A_B , 同时计算出相似变换矩阵 P, Q . 即 $P^{-1}AP = A_A, Q^{-1}BQ = A_B$.

Step2 将式(10)重写为 $P^{-1}APP^{-1}XQ + P^{-1}XQQ^{-1}BQ = P^{-1}CQ$, 进一步 $A_A P^{-1}XQ + P^{-1}XQ A_B$

$$= P^{-1}CQ.$$

Step3 将 $P^{-1}XQ$ 看作整体 Y , 根据对角矩阵与一般矩阵乘积的特点计算出 $Y(i, j) = \frac{P^{-1}CQ(i, j)}{A_A(i, i) + A_B(j, j)}$.

Step4 根据 $X = PYQ^{-1}$, 计算出复原结果 X .

以上对目标梯度场的重建无需多次迭代, 充分考虑到了 A, B 两矩阵的特点, 只需一次的矩阵变换就能完成目标梯度场的复原, 在时间复杂度上明显优于传统的“微分迭代法”.

5 算法结果及分析

为验证本文算法适用于图像的细节增强, 取公共测试集中若干受光照影响较大、细节信息缺失的图像进行算法之间的对比实验, 结果如图7~图9.



图7 风景图像增强效果对比

5.1 主观图像质量评价

观察各算法的增强结果, 可看出直方图均衡算法(HE 算法)虽然在整体上提高了图像的明暗程度, 但出现了明显的块状效应, 灰度级“吞噬”现象严重, 图像对比度体现较差. 例如图8(b)天鹅的羽毛整体变亮, 但原图的阴影部分消失. AHE 算法在 HE 算法的基础上引入了自适应技术, 图像增强之后的效果也提升很多, 但增强后的结果与原图相比, 真实性有所欠缺, 例如图7(c)的云朵和图8(c)天鹅中羽毛的阴影部分虽然得到增强但显得很不自在. 局部均衡化算法的增强结果斑点和噪声过多. Retinex 算法可使图像得到有效的光照补偿, 但图9(e)的增强结果使原图黑色底板处的亮度也得到了提高, 该算法的区域自适应性较差, 增强结果中也出现了 HE 算法中的缺点. 本文算法(GFBE 算法)

的增强结果是以上算法中最好的, 不但在整体上改善了图像的明暗程度, 而且可以有效地提高了图像阴暗区域中的细节信息, 如图7(a)树叶中阴暗区域的细节、图8(a)草坪中阴暗区域的细节和图9(a)骨骼中阴暗区域的细节在增强结果中都得到了提升. HE 算法、AHE 算法和局部直方图均衡化算法其作用范围都在图像的时域, 容易发生灰度级的“吞噬”, 本文认为这是增强结果表现不佳的主要原因. 本文算法作用范围是图像梯度域, 通过梯度域的有效均衡使细节很好地呈现, 而后重建梯度域得出时域的增强结果可避免以上各类算法的不足.

5.2 客观图像质量评价

常用的图像质量客观评价指标主要有峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)、结构相似度(Structural

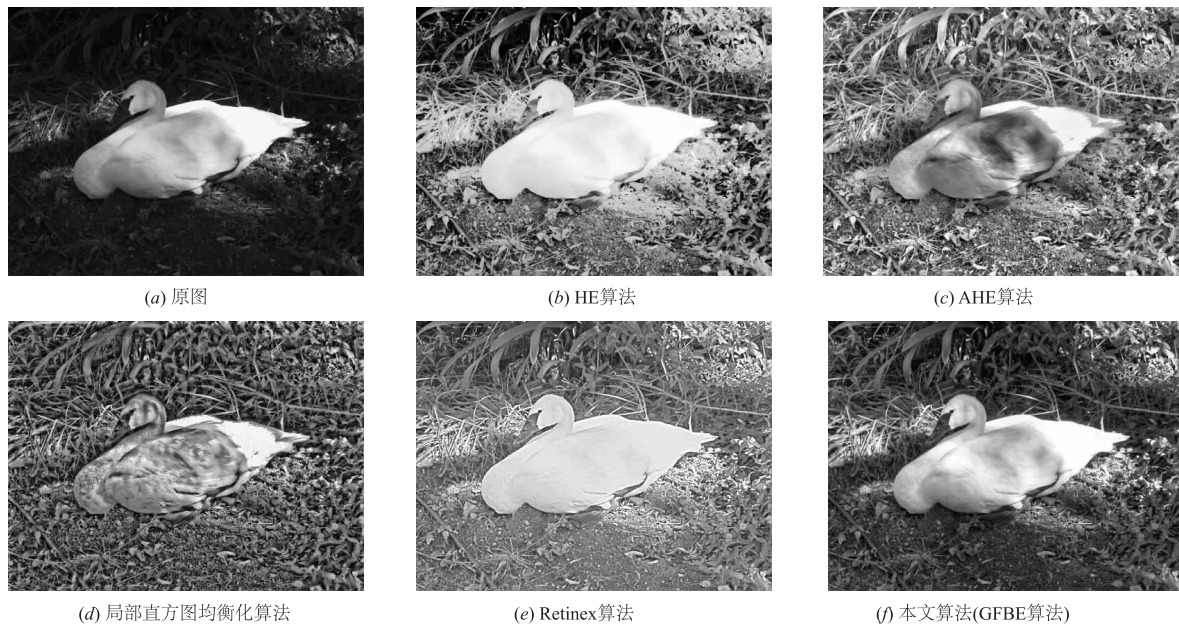


图8 动物图像增强效果对比

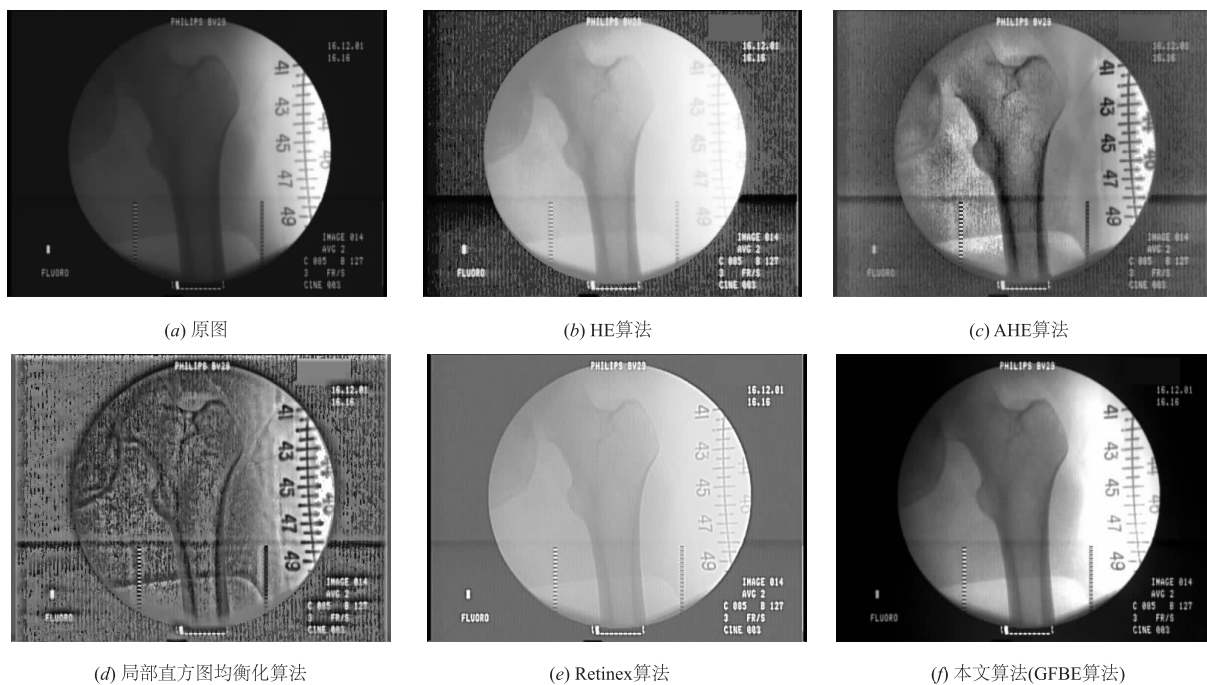


图9 医学图像增强效果对比

Similarity, SSIM)、信息熵 (Entropy)、平均梯度 (Average Gradient, AG) 等^[22,23]. PSNR 和 SSIM 这两项指标属于有参考图像质量评价,用来度量两幅图像的相似程度,被广泛应用于图像去噪和图像复原中.对于图像增强,不宜通过两幅图像的相似程度评价增强结果的好坏,故而本文不采用 PSNR 和 SSIM 这两个指标作为客观质量评价.图像信息熵属于无参考图像质量评价,反映了图像中平均信息量的多少,可定量描述图像色彩的丰

富程度,信息熵越大,则图像的色彩程度越丰富,对于灰度值范围在 0~255 的图像,其图像信息熵的最大值为 8.信息熵的计算公式如式(12),对于图像信息熵的计算, p_i 表示灰度级中像素个数的频率, N 表示灰度级个数.图像平均梯度也属于无参考图像质量评价,它描述了图像灰度变化率,是一幅图像细节信息丰富程度的量化指标.计算公式如式(13),式(13)中 M 和 N 分别代表图像的高和宽, f 代表图像的灰度值.本文采用

信息熵和平均梯度对各算法的增强结果进行图像客观质量评价.

$$\text{Entropy} = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (12)$$

AG =

$$\frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{[f(i+1,j) - f(i,j)]^2 + [f(i,j+1) - f(i,j)]^2}}{(M-1)(N-1)} \quad (13)$$

将图 7、图 8、图 9 中的各子图按照式 (12) 和式 (13) 分别计算信息熵和平均梯度. 计算结果如表 1 和表 2 所示. 通过表 1 和表 2 可知, 本文算法对于原图的信息熵和平均梯度有较大地提升而且与其他增强算法相比结果表现较好.

表 1 不同算法处理结果信息熵对比

| 序号 | 原图 | 算法 | | | | |
|-----|------|------|------|-------|---------|------|
| | | HE | AHE | 局部均衡化 | Retinex | 本文 |
| 图 7 | 7.18 | 5.76 | 7.66 | 7.73 | 7.09 | 7.81 |
| 图 8 | 6.59 | 5.57 | 7.78 | 7.68 | 7.53 | 7.62 |
| 图 9 | 5.72 | 4.57 | 7.17 | 7.30 | 6.34 | 6.22 |

表 2 不同算法处理结果平均梯度对比

| 序号 | 原图 | 算法 | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | | HE | AHE | 局部均衡化 | Retinex | 本文 |
| 图 7 | 12.14 | 15.10 | 25.68 | 33.63 | 26.39 | 20.04 |
| 图 8 | 7.85 | 23.81 | 25.72 | 27.61 | 25.30 | 20.25 |
| 图 9 | 2.41 | 9.93 | 8.59 | 19.83 | 5.59 | 10.83 |

6 结论

本文充分考虑图像梯度幅值直方图的特点, 提出了图像梯度场双区间均衡化的细节增强方法, 具有易操作、增强效果好等特点. 区间均衡化技术可将均衡化操作限定在一定范围内, 使其更为有效地“削峰”而减弱灰度级的“吞噬”. 本文在目标梯度场的数值重建过程中, 采取矩阵变换法替代了传统的“微分迭代法”, 有效地降低算法的时间复杂度. 通过实验结果可以看出本文算法可以有效地增强图像的细节信息.

参考文献

- [1] 章毓晋. 图像处理(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
ZHANG Yu-jin. Image Processing (Third Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [2] STARK J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5): 889 - 896.

- [3] 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.
- [4] 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 598 - 602.
WU Cheng-mao. Studies on mathematical model of histogram equalization [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 598 - 602. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 江巨浪, 张佑生, 薛峰等. 保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 861 - 866.
JIANG Ju-lang, ZHANG You-sheng, XUE Feng, et al. Local histogram equalization with brightness preservation [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 861 - 866. (in Chinese)
- [7] 王大凯, 侯榆青, 彭进业. 图像处理的偏微分方程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 丁畅, 尹清波, 鲁明羽. 数字图像处理中的偏微分方程方法综述[J]. 计算机科学, 2013, 40(S2): 341 - 346.
DING Chang, YIN Qing-bo, LU Ming-yu. Summary of partial differential equation (PDE) method on digital image processing [J]. Computer Science, 2013, 40(S2): 341 - 346. (in Chinese)
- [9] WANG H C, CHEN Y Q, FANG T, et al. Gradient adaptive image restoration and enhancement [A]. Proceedings of the International Conference on Image Processing [C]. Atlanta, USA: IEEE Press, 2006. 2893 - 2896.
- [10] 赵文达, 续志军, 赵建, 等. 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1962 - 1968.
ZHAO Wen-da, XU Zhi-jun, ZHAO Jian, et al. Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1962 - 1968. (in Chinese)
- [11] ZUO W M, ZHANG L, SONG C W, et al. Texture enhanced image denoising via gradient histogram preservation [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Portland, USA: IEEE Press, 2013. 1203 - 1210.
- [12] 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.
ZHU Li-xin, HENG P A, XIA De-shen. Image contrast enhancement by gradient field equalization [J]. Journal of

- Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19 (12):1546 – 1552. (in Chinese)
- [13] 茆诗松,程依明,濮晓龙. 概率论与数理统计教程(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [14] 蔡岭,董方敏,刘勇,等. 图像梯度场 Gamma 混合分布模型及其求解[J]. 中国图象图形学报,2006,11(12):1750 – 1757.
CAI Ling, DONG Fang-min, LIU Yong et al. Hybrid Gamma distribution model of image gradient field and its solution[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11 (12):1750 – 1757. (in Chinese)
- [15] SEN D, PAL S K. Gradient histogram: Thresholding in a region of interest for edge detection[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(4):677 – 695.
- [16] LAND E H. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision[A]. Proceedings of the National Academy of Science[C]. Boston, USA, 1986. 3078 – 3080.
- [17] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using Dark Channel Prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12):2431 – 2353.
- [18] 张登银,鞠铭焯,王雪梅. 一种基于暗通道先验的快速图像去雾算法[J]. 电子学报, 2015, 43(7):1437 – 1443.
ZHANG Deng-yin, JU Ming-ye, WANG Xue-mei. A fast image daze removal algorithm using dark channel prior [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7):1437 – 1443. (in Chinese)
- [19] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7):629 – 639.
- [20] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4):321 – 331.
- [21] 老大中. 变分法基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. 82 – 84.
- [22] 王志明,殷绪成,曾慧. 数字图像处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2012. 13 – 15.
- [23] 才溪. 多尺度图像融合理论与方法[M]. 北京:电子工业出版社,2014. 21 – 26.

作者简介



丁畅男,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



董丽丽(通信作者)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



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@dlmu.edu.cn