

文章编号: 2095-4980(2019)06-1071-07

人眼视觉拟合函数的小波系数插值图像增强

章 怡^a, 王海峰^a, 刘 梁^b, 常家树^b

(江苏理工学院 a.信息中心; b.机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 空域中直方图增强图像容易产生灰度级断层, 导致对比度过分增强、图像局部过亮、细节不清晰等问题。提出一种人眼视觉拟合函数的小波系数插值均衡图像增强方法。算法通过二代小波整数变换, 对待增强图像作单层小波分解; 在小波低频系数中进行均衡、插值、再均衡计算; 最后, 将新的低频系数重构图像并归一化, 通过人眼视觉拟合函数输出图像。实验结果表明, 本方法有效解决了增强图像亮度过亮造成细节不清或丢失、灰度层次感不强的问题。本算法增强的图像视觉效果柔和, 更适合图像后续处理与分析。

关键词: 直方图均衡; 二代小波; 系数插值; 灰度层次; 视觉拟合函数

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1071

A wavelet coefficient interpolation image enhancement based on visual fitting function

ZHANG Yi^a, WANG Haifeng^a, LIU Liang^b, CHANG Jiashu^b

(a.Information Center; b.School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu 213001, China)

Abstract: In the airspace, Histogram Enhanced image is prone to cause grayscale faults, which will lead to excessive enhancement of image contrast, partial overlighting and unclear details. A new method of image enhancement based on human visual fitness function is proposed. First of all, the algorithm performs single layer transform on the image through the lifting wavelet. Secondly, it is balanced, interpolated and re-balanced in the low frequency coefficients of wavelet. Finally, the new low frequency coefficients are reconstructed and normalized, and the image is output through the human eye vision fitting function. The experimental results show that this method can effectively solve the problems that the enhanced image brightness is too high, the details are not clear or lost, and the gray level is not strong. The image enhanced by this algorithm has a soft visual effect and is more suitable for image subsequent processing and analysis.

Keywords: histogram equalization; lifting wavelet; coefficient interpolation; gray level; visual fitting function

数字图像采集过程中, 易受采集设备、环境等外部因素影响, 采集的数字图像包含噪声, 给后续图像处理带来极大问题^[1]。采集的数字图像需做去噪、增强等预处理, 用于图像后续识别与分析。图像增强是图像预处理的基本技术, 主要增加图像的对比度, 突出有用信息。目前图像增强处理方法主要分为空域和频域两类。空域是直接对图像像素值进行处理, 以调整灰度分布为出发点, 在整幅图像范围内进行灰度修正^[2-3]。相关算法以经典直方图均衡方法及相关直方图改进算法居多。这些算法虽具有运算速度快、增强效果明显的优点, 但存在灰度级被合并、灰度级断层现象, 从而丢失了图像宝贵的细节部分^[4-5]。频域增强算法主要有余弦变换、傅里叶变换、小波变换等, 主要是将待增强图像在某个变换域进行变换处理, 然后通过相应的逆变换获得增强图像。余弦变换与傅里叶变换增强图像容易去除图像的细节和突变信息, 图像过度平缓等^[6]。小波变换是空间和频率的局部变换, 数字图像经过小波变换可以将图像分解成各个尺度的多层低频与高频信息, 可以有选择性地对低频或高频系数进行增强处理, 增强图像对比度, 丰富图像细节信息^[7]。小波变换既有效解决了空域增强图像造成灰度级减少、细

收稿日期: 2018-05-23; 修回日期: 2018-09-03

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(18KJB520012); 江苏省常州市科技计划资助项目(CE20165049)

节丢失等问题,又能在增强图像的同时减少噪声。

针对空域增强图像比原图像灰度级减少,图像细节易丢失的问题,本文从小波变换域的角度,对待增强图像进行单层小波分解,对低频小波系数进行均衡与插值处理。经过小波插值增强的图像对比度增强的同时,灰度级数也大大增加,图像细节更加丰富,图像视觉效果更加柔和。

1 直方图均衡灰度级缺失分析

直方图均衡处理是将直方图进行累加,得到图像的累积概率密度函数^[8-10]:

$$c(r_k) = \sum_{i=0}^k P(r_i), \quad k=0,1,2,\dots,L-1 \quad (1)$$

式中: $P(r_k) = n_k / N$ 为灰度 r_k 的概率; N 为灰度数字图像像素总数。

直方图均衡处理灰度映射函数:

$$T(r_k) = (L-1)c(r_k) \quad (2)$$

从式(2)可以推导出原图像中相邻两灰度级变换后的距离 Δd :

$$\Delta d = T(r_k) - T(r_{k-1}) = (L-1)n_k / N = (L-1)P(r_k) \quad (3)$$

由此可见,相邻灰度级在直方图均衡化之后的间距与 $P(r_k)$ 有关,其数值的大小决定了该方法在增强图像时存在亮度增强不足或饱和的问题。尽管自适应直方图或局部直方图均衡化在一定程度上可以解决该问题,但仍有上述缺陷。原图像在直方图均衡化处理后灰度级数减少,丢失了一部分原图细节信息^[11-13]。

2 二代小波整数变换

二代小波变换是对小波基的一种提升方案,小波提升算法是一种新的双正交小波构造方法,通过预测算子,确定高频信息,并初步确定低频信息,然后通过更新算子,对初步确定的低频信息进行修正,从而确定低频信息。提升算法作为第二代小波变换的关键技术,主要包括分解、预测和更新3个处理步骤^[14]。

1) 分解:将原始输入信号 s_j 分解成偶数序列和奇数序列,分解过程表示为 $F(s_j) = (s_{j-1}, d_{j-1})$ 。其中, s_{j-1} 表示信号的低频近似分量, d_{j-1} 表示信号的高频细节分量, $F(s_j)$ 为分解过程。

2) 预测:利用数据间的相关性,用偶数序列预测奇数序列,预测误差为 $d_{j-1} = d_{j-1} - P(s_{j-1})$,其中 $P[\cdot]$ 为预测算子。

3) 更新:通过算子 U 产生一个更好的子数据集 s_{j-1} ,使之保持原有数据集 s_j 的一些特性。更新过程表达式为: $s_{j-1} = s_{j-1} + U(d_{j-1})$,其中 $U[\cdot]$ 为更新算子。

小波提升过程完全可逆,其反变换与正变换结构对称,运算相反,可实现精确重构,二代小波的分解与重构如图1所示。

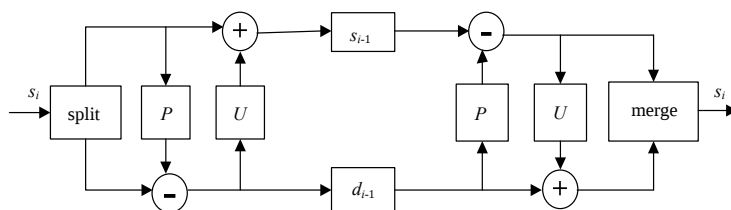


Fig.1 Decomposition and reconstruction of lifting wavelet transform

图 1 二代小波变换的分解与重构

3 算法实现过程

3.1 人眼视觉特性拟合函数

二代小波整数重构数据超出8位灰度级最大值,需要转换至8位灰度图像,同时要符合人眼视觉对图像亮度一般是从最暗到最亮的变化。因此,本文采用一种符合人眼视觉特性的拟合函数对重构数据进行增强处理^[15-16]。人眼视觉拟合函数为:

$$f(x) = a - b \log\left(\frac{1}{x} - 1\right) \quad (4)$$

$$F(x) = \text{UINT8}[255 \times f(x)] \quad (5)$$

式中： a 为平均亮度调节； b 为对比度拉伸幅度； x 输入范围为 $[0,1]$ 。为保证图像不失真， a, b 取值范围为 $(0,1)$ ；UINT8函数将数据转换至8位灰度图像。

当拉伸幅度参数 b 一定时， a 值越大，图像整体亮度就越亮；反之，图像整体亮度就越暗(图2)；当平均亮度调节参数 a 一定时，对比度拉升幅度参数 b 越大，图像对比度就越大；反之则越小(图3)。图4分别为 $b=0.3$ 与 $a=0.5$ 时，不同参数变化曲线。

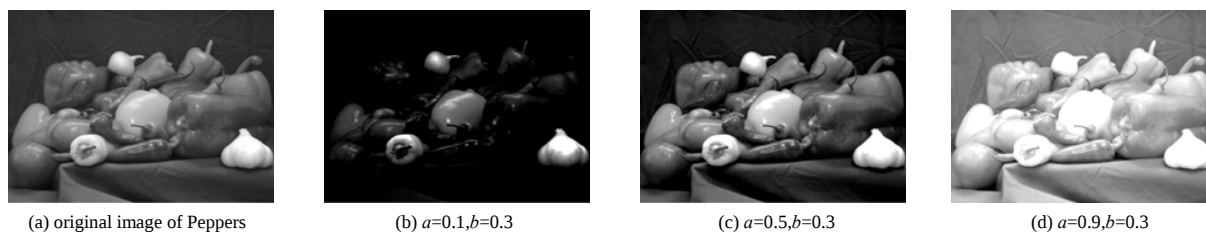


Fig.2 Images varying with parameter a
图2 参数 a 变化效果图

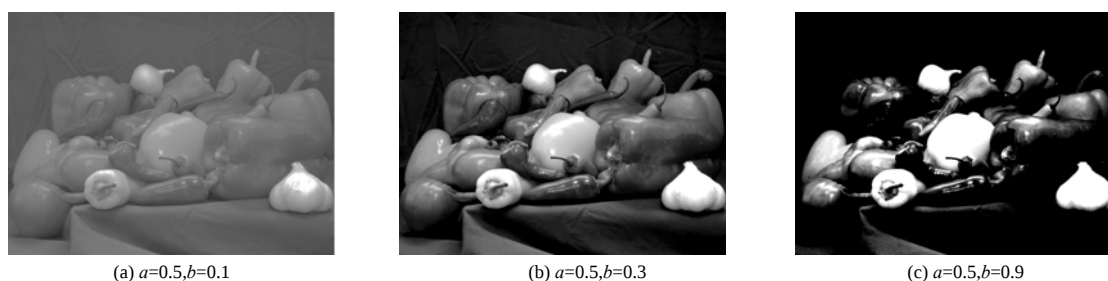


Fig.3 Images varying with parameter b
图3 参数 b 变化效果图

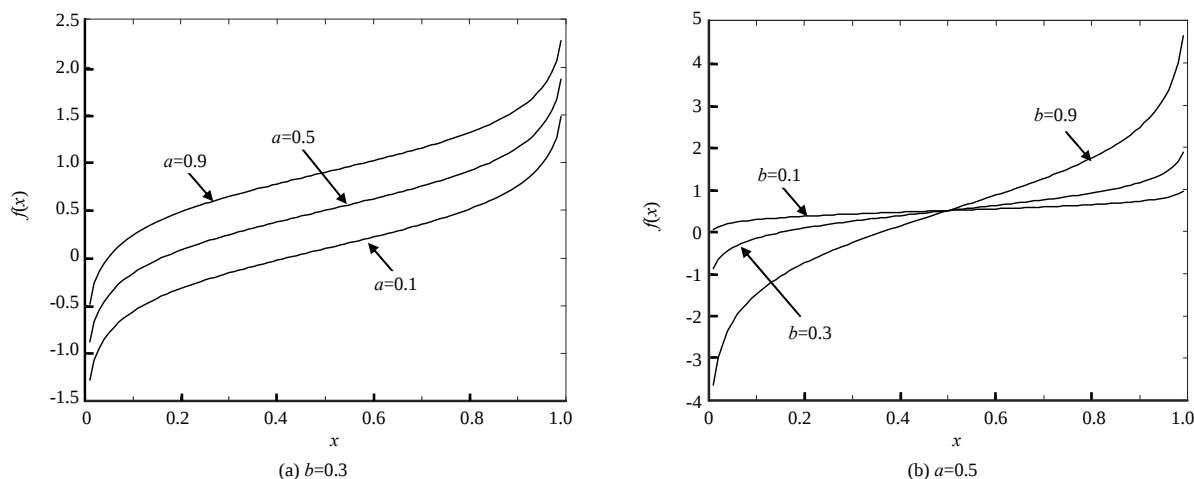


Fig.4 Curves of different parameters
图4 不同参数的变化曲线

3.2 算法步骤

人眼视觉拟合函数，本文取 $a=0.6, b=0.4$ ，实际运算过程中，二代小波重构图像归一化处理后，再经人眼视觉拟合函数处理时，将小于0的数作为0处理。

空域直方图均衡化增强图像时，不可避免造成图像灰度级减少，图像层次不丰富。为实现算法增强图像的同时，还能增加图像灰度级，提高图像视觉效果，算法经二代小波(db1小波提升)对待增强图像进行小波单层分解，对小波分解的低频系数进行均衡与插值处理，算法具体步骤为：

- 1) 对待增强图像 I 作二代小波整数变换，变换后的系数为 c_a, c_h, c_v, c_d ；
- 2) 求 $c_a > 0$ 各系数个数 $h(k)$ 及 $h(k) \neq 0$ 的级数 n ；
- 3) 计算 $c_a > 0$ 最值 $k_{\max}, k_{\min}$ ，并在区间 $[k_{\max}, k_{\min}]$ 对 $c_a > 0$ 系数作均衡化处理，得新系数 c_{a1} ；
- 4) 求 c_{a1} 各系数个数 $h_1(k)$ 及 $h_1(k) \neq 0$ 的级数 n_1 ；

- 5) 求 $h_1(k)$ 级数间隔 g , 并按从大到小顺序排列;
- 6) 依次取出间隔 g , 遍历 $h_1(k)$ 所有间隔 g_1 , 若 $g=g_1$, 则插入位置级数值 $p=\text{round}(k+g/2)$ 、级数个数 $h_1(p)=\text{round}\left[\frac{h_1(k-1)+h_1(k+g)}{2}\right]$, 其中 $h_1(k-1)\neq 0$ 与 $h_1(k+g)\neq 0$, 循环级数 $n_3=n_3+1$, 直至 $n_3=n-n_1$ 退出循环, 插入后新的级数排列为 $h_2(k)$;
- 7) 将 $h_2(k)$ 按系数 k 从小到大一一映射至 $h(k)$, 构成新的 $h_3(k)$;
- 8) 对 $c_a>0$ 按新的 $h_3(k)$ 作均衡化处理, 构成新的 c_{a2} ;
- 9) 对系数 c_{a2}, c_h, c_v, c_d 二代小波重构, 输出图像为 I_1 ;
- 10) 将 I_1 转换至 $[0\ 1]$ 区间, 按公式: $y=\text{round}\{255\times[0.5-0.3\times\log(1/x-1)]\}$ 进行至 $[0\ 255]$ 灰度区间, 输出最终图像为 I_2 。算法流程如图5所示。

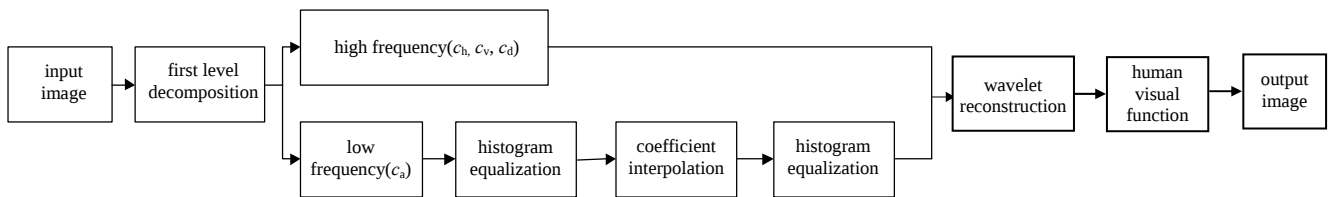


Fig.5 Basic flow chart of the algorithm
图5 算法基本流程图

4 实验结果与分析

本文算法目的是在增强图像对比度的同时, 增加图像的灰度级数(即图像层次), 丰富图像细节, 提高图像视觉效果。为验证算法的有效性, 从主观与客观两方面进行实验分析, 将文献[8]提出的BBHE(Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization)算法、文献[9]提出的MMBEBHE(Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization)算法及文献[7]方法与本文方法进行比较。实验环境: windows7系统Intel Pentium CPU G860, 主频3.0 GHz, 内存4G, 编程语言Matlab 2016b。实验分2组进行: 一组是正常照度灰度图像; 一组是低照度红外图像。

4.1 第 1 组实验

实验图像选取3幅正常照度图像: 一幅分辨力为 512×512 的标准Lena灰度图像, 一幅分辨力为 512×512 的peppers灰度图像, 另一幅为 450×355 的Baboon灰度图像, 实验原图像如图6所示, 增强结果如图7所示。



Fig.6 Experimental images of normal illuminance
图6 正常照度图像





Fig.7 Enhancement results of normal illuminance images
图 7 正常照度图像增强结果

从 3 幅正常照度图像增强结果看，4 种算法在增强图像的平均亮度上基本一致。在对比度增强方面，本文算法较其他 3 种算法的增强图像在对比度与层次感上显得更强烈、明显一些。

4.2 第 2 组实验

算法优越性除了在正常照度图像增强表现外，也适用于低照度的红外图像增强。选取 2 幅低照度红外图像：一幅图像大小为 350×269 的鹿图像，另一幅为 350×241 的豹图像，2 幅图像均来自互联网。实验原图像如图 8 所示，增强结果如图 9 所示。



(a) Deer image (b) Leopard image

Fig.8 Infrared images of low illuminance
图 8 低照度红外图像

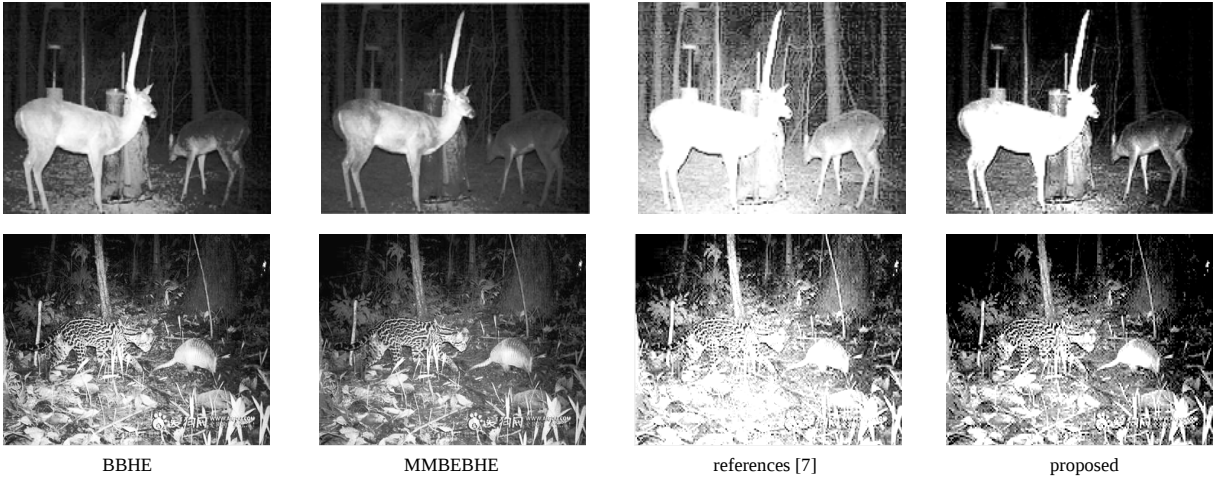


Fig.9 Enhancement results of low illumination infrared images
图 9 低照度红外图像增强结果

从增强图像亮度看,文献[7]算法增强的图像最亮,但出现过增强、有大片发白现象,其余3种算法增强的红外图像平均亮度基本一致。因红外图像中存在一定噪声,在增强“鹿”图像时,可以发现本文算法对噪声的抑制比其他算法要好些,如在BBHE,MMBEBHE,文献[7]增强图像暗背景下存在发白点比较明显,这是噪声被放大的缘故。

4.3 实验客观评价指标

上面是从人眼视觉的角度给出的评价,为客观有效地评价算法的有效性,引入亮度差、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、标准差作定量分析。

1) 亮度差:

$$\Delta Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (6)$$

2) 峰值信噪比:

$$PSNR = 10 \lg \frac{\max^2}{MSE} \quad (7)$$

3) 标准差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (8)$$

式中: x, y 分别代表原图像与增强图像; $\max$ 为8位灰度最大值255; MSE 为原图像与增强图像之间的均方误差; μ 为图像所有灰度均值。

亮度差衡量增强图像与原图像亮度保持的程度,亮度差越小,表明亮度保持越好;反之则差。 $PSNR$ 是衡量算法对噪声的抑制效果,该值越大,表明算法对噪声抑制越好,图像越清晰;反之则差;标准差是衡量图像增强对比度的重要指标,标准差越大,图像的对比度越大;反之则小。几种算法增强结果数据如表1、表2所示。

表 1 正常照度增强结果

Table1 Results of normal illuminance images

	Baboon			Lena			Peppers		
	ΔY	$PSNR$	σ	ΔY	$PSNR$	σ	ΔY	$PSNR$	σ
original graph	128.59	—	40.27	124.04	—	47.85	104.21	—	57.40
BBHE	2.59	27.54	74.38	8.94	27.25	74.12	14.98	27.80	74.84
MMBEBHE	1.27	27.74	73.84	0.72	28.17	71.62	0.65	33.21	61.30
Ref.[7]	4.02	37.21	52.86	2.77	36.58	56.63	3.35	30.71	61.80
proposed	12.59	28.72	82.31	2.02	27.73	84.50	13.63	26.82	101.17

从表 1 的正常图像增强结果看,在亮度保持上,MMBEBHE 算法的亮度差值最小;在噪声抑制效果上,文献[7]算法的 $PSNR$ 值最大,噪声抑制效果最好;在对比度增强上,本文算法的标准差最大,表明对比度增强效果最优。从表 2 的低照度红外图像增强结果看,文献[7]的亮度差与 $PSNR$ 最优,说明文献[7]算法在低照度红外图像处理上的亮度保持与噪声抑制性能较好;在低照度红外图像对比度增强上,本文算法最大,表明算法在对比度增强上最优。

综上所述,本文算法与其他3种算法相比较,增强图像的整体亮度与噪声抑制良好,图像对比度比较明显,视觉层次感强。

5 结论

针对空域直方图均衡方法引起的灰度级被合并、图像局部过亮、细节不清晰等缺点,提出了一种基于小波变换的系数插值均衡图像增强方法。算法通过二代小波整数变换,在小波低频系数中进行均衡、插值,再均衡计算,将新的低频系数重构图像并归一化,最后通过人眼视觉拟合函数输出图像。本文方法适合正常照度与低照度红外图像增强,处理后的图像亮度适中,灰度层次好,细节清晰,消除了以往算法造成局部过亮问题。如何对高频系数进行增强处理,使图像细节更突出、清晰,是今后需要研究的方向。

表 2 低照度红外图像增强结果

Table2 The results of low illuminance infrared images

	Deer			Leopard		
	ΔY	$PSNR$	σ	ΔY	$PSNR$	σ
original graph	61.41	—	33.68	82.03	—	62.04
BBHE	13.06	29.03	69.77	19.44	26.42	74.65
MMBEBHE	3.02	31.02	56.79	13.19	26.34	64.98
Ref. [7]	2.64	33.62	42.74	3.81	31.87	66.26
proposed	8.25	28.81	98.74	24.23	26.60	92.42

参考文献:

- [1] SHI Zhenghao,ZHU Meimei,GUO Bin,et al. A photographic negative imaging inspired method for low illumination night-time image enhancement[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017,76(13):15027–15048.
- [2] WONG C Y,JIANG G N,RAHMAN M A,et al. Histogram equalization and optimal profile compression based approach for color image enhancement[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016(38):802–813.
- [3] YUN J H,CHOI M R,LEE S S. An image enhancement method for extracting multi-license plate region[J]. Transactions on Internet and Information Systems, 2017,11(6):3188–3207.
- [4] 王合龙,边栓成. 一种增强细节的红外图像处理算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):139–142. (WANG Helong, BIAN Shuancheng. Detail enhancement algorithm based on infrared image transform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):139–142.)
- [5] 陈永亮,王华彬,陶亮. 自适应动态峰值剪切直方图均衡化[J]. 计算机工程与应用, 2015,51(1):167–171. (CHEN Yongliang, WANG Huabin, TAO Liang. Adaptive dynamic clipped histogram equalization[J]. Computer Engineering and Applications, 2015,51(1):167–171.)
- [6] KHAN S U,CHAI W Y,SEE C S,et al. X-ray image enhancement using a boundary division Wiener filter and wavelet-based image fusion approach[J]. Journal of Information Processing Systems, 2016,12(1):35–45.
- [7] 王海峰. 一种小波域多边小波系数直方图均衡算法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2013,36(3):344–349. (WANG Haifeng. A histogram enhancement algorithm about multilateral wavelet coefficients on wavelet domain[J]. Journal of Shanxi University(Natural Science Edition), 2013,36(3):344–349.)
- [8] KIM Y T. Contrast enhancement using Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997(43):1–8.
- [9] CHEN S D,RAML I A R. Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization in contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003(49):1310–1319.
- [10] 刘燕妮,张贵仓,安静. 基于数学形态学的双直方图均衡化图像增强算法[J]. 计算机工程, 2016,42(1):215–219. (LIU Yangni, ZHANG Guicang, AN Jing. Double histogram equalization image enhancement algorithm based on mathematical morphology[J]. Computer Engineering, 2016,42(1):215–219.)
- [11] HUANG Jun,MA Yong,ZHANG Ying,et al. Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram segmentation[J]. Applied Optics, 2017,56(35):9686–9697.
- [12] LI Yi,ZHANG Yunfeng,GENG Aihui,et al. Infrared image enhancement based on atmospheric scattering model and histogram equalization[J]. Optics and Laser Technology, 2016(83):99–107.
- [13] PARK Seonhee,YU Soohwan,MOON Byeongho,et al. Low-light image enhancement using variational optimization-based retinex model[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017,63(2):178–184.
- [14] 李广琼,陈荣元. 基于 EMD 和自适应提升小波分析的图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2014,50(21):195–199. (LI Guangqiong, CHEN Rongyuan. Image enhancement based on EMD and adaptive lifting wavelet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2014,50(21):195–199.)
- [15] 睢丹,焦振,杨杰. 基于小波分析和 Retinex 算法的图像增强算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2016,54(3):592–596. (SUI Dan, JIAO Zhen, YANG Jie. Image enhancement algorithm based on wavelet analysis and Retinex algorithm[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2016,54(3):592–596.)
- [16] CHENG Yanyan,YUAN Quanbo. Image enhancement based on human visual model[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2016,9(2):135–142.

作者简介:



章 怡(1983–), 女, 江苏省常州市人, 工程师, 主要研究方向为数字图像处理与分析。
email:zhangyi@jsut.edu.cn.

王海峰(1977–), 男, 江苏省常州市人, 高级工程师, 主要研究方向为信息隐藏、数字图像处理与分析。

刘 梁(1995–), 男, 江苏省常州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与分析。

常家树(1992–), 男, 江苏省常州市人, 硕士, 主要研究方向为数字图像处理与分析。