

基于人眼频率特性的分形增强算法

贾瑞明, 郑奇

(北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144)

摘要:提出了一种基于人眼频率特性的分形增强算法,通过计算分形维和人眼感知频率范围选择需要增强的图像细节,依据人眼灰度分辨特性对图像细节进行增强。首先,将人眼频率特性和分形维数相结合对图像进行增强。在频率域范围内计算出人眼感知的图像空间频率,通过频域滤波得到人眼敏感的图像区域,并结合分形维数的理论值对图像进行增强。其中,计算像素点的分形维数是用改进后的计算方法,即采用了 5×5 的模板和欧式距离。另外,提出了一种基于人眼灰度分辨特性的图像增强新方法。在不同的灰度范围内,人眼对灰度的分辨能力不同,利用这一特性对红外图像进行增强,使得人眼敏感的细节部位更加突出,相比于传统的增强算法图像更适合人眼的观察。

关键词:人眼频率特性;空间频率;分形维数;灰度分辨能力;红外图像

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.022

Fractal enhancement algorithm based on frequency characteristics of human eyes

JIA Rui-ming, ZHENG Qi

(The Academy of Electronic Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: A fractal enhancement algorithm based on frequency characteristics of human eyes is proposed. First of all, combining the frequency characteristic of human eye with fractal dimension, the images are enhanced. Then, the spatial frequency of human eye perception is calculated in frequency domain, and the sensitive image region of human eye is obtained by frequency domain filtering, and the images are enhanced by using the theoretical value of fractal dimension. This method uses a model with a size of 5×5 and Euclidean distance. In addition, a new enhancement method based on the gray scale resolution characteristics of human eye is proposed. In the range of different gray levels, human eye's resolution to grayscale is different. Using this characteristic, the sensitive details of the eye is more prominent. Compared with the traditional algorithm, the proposed enhancement algorithm is more suitable for human eye.

Key words: the frequency characteristic of human eyes; spatial frequency; fractal dimension; gray resolution; infrared image

1 引言

近年来,国内外许多研究者在红外图像增强方面已进行了大量的研究,如视网膜皮层(Retinex)理论^[1]、小波理论^[2]和遗传算法等。Edwin H. Land 与

McCann 于 1971 年提出的基于人类视觉感知物体颜色和亮度的视觉模型^[1],在继 Edwin H. Land 提出基本的 Retinex 理论后,出现了多种形式的 Retinex 算法:如变分框架下的 Retinex 算法^[3]、消除光晕的和

基金项目:北方工业大学科研启动基金和优青计划资助。

作者简介:贾瑞明(1978-),男,博士,研究方向为图像处理,智能识别。E-mail:jamin_han@163.com

收稿日期:2017-10-19;修订日期:2018-03-12

细节增强的多尺度 Retinex 图像增强算法^[1]以及基于自适应尺度因子的 Retinex 图像增强算法^[4]等等。但 Retinex 理论在明暗对比强烈的边缘处,会出现光晕现象直接影响图像的质量^[1]。小波变换常用的算法有:高频增强法、基于小波变换的低照度图像自适应增强算法^[2]、基于平稳小波变换和 Retinex 的图像增强方法^[5]等等。但其在光照不足或不均匀的图像中增强时处理效果不佳,而且在小波重构过程中容易丢失原有的部分时域信号。

针对以上算法的不足,提出了一种基于人眼频率特性的分形增强算法。首先根据人眼对比灵敏度曲线得到人眼敏感的空间频率范围,进而在频域滤波后获取图像中人眼敏感的细节部位;其次将分形布朗运动作为图像的描述模型^[6],图像的灰度可以看作是一个凹凸不平的曲面,它符合分形布朗运动原理;此外,人眼对于灰度的分辨能力是不同的^[7],灰度较高或较低时人眼的分辨能力较弱,而中间灰度区域则分辨能力较强,因而根据这一特性可以对图像中的不同灰度区域进行自适应增强。

基于以上理论,本文提出的基于人眼频率特性的分形增强算法,使增强后的图像不仅对比度有所提升,既克服了 Retinex 增强中的光晕现象,又适应于小波增强处理效果不佳的光照不足或不均匀的图像,而且人眼敏感的细节区域更加突出,相比于传统的增强算法,更适应于人眼的观察。

2 算法原理

2.1 理论基础

(1) 基于人眼感知的图像空间频率

视觉的空间频率 (Spatial Frequency) 是指单位

$$H = \frac{\log \frac{1}{N_{r>1}} \sum_{r>1} |I(x_a, y_a) - I(x_0, y_0)| - \log \frac{1}{N_{r=1}} \sum_{r=1} |I(x_1, y_1) - I(x_0, y_0)|}{\log r} \quad (3)$$

式中, $N_1 \{P_a(x, y)\}$ 是距 (x_0, y_0) 为 1 的 4 个像素点 ($r=1$), $N_2 \{P_b(x, y)\}$ 是距 (x_0, y_0) 大于 1 的多个像素点 ($r>1$), I 为像素点灰度值, r 为两个像素点之间的距离, H 为所求像素点 (x_0, y_0) 的分形参数, N_r 是点 (x, y) 到点 (x_0, y_0) 距离为 r 的像素点总数。通过公式(4)可以得到所求像素点 (x_0, y_0) 处的分形维数:

$$D = D_T + 1 - H \quad (4)$$

其中, D_T 为图像表面的拓扑维数,对于平面图像它

视角内明暗条纹重复出现的周期数,单位是“周/度”,一般用符号 f 表示^[8]。在人眼视觉的研究领域中,人眼观察视角 α 的计算公式如下:

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{S}{2D} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中, S 是目标图像的宽度; D 为观察者距目标图像中心的距离。

人眼在观察物体时,视觉系统类似于一个傅里叶分析器,在图像处理技术中,要将人眼视觉特性应用于图像处理中,必须将图像从空间域变换到频率域。经研究发现,频谱图上任意两点间经反变换均呈现一个正弦周期条纹,若两点间间隔 N 个像素点,则明暗条纹重复 N 个周期。因此,一幅大小为 $m \times n$ 的图像 $I(x, y)$ 经过傅里叶变换^[9] 得到其频谱图 $F(u, v)$,再将频谱图经对角变换后,使得直流分量位于频谱图的中心位置,从而通过变换后的频谱图的位置来计算 (u, v) 处人眼视觉上的空间频率。人眼视觉空间频率为:

$$f = \frac{\sqrt{u'^2 + v'^2}}{\alpha} \quad (2)$$

其中, $u' = |u - \frac{m}{2}|$, $v' = |v - \frac{n}{2}|$ 。

(2) 图像的分形维数

Mandelbrot^[10] 研究发现,随机运动是自然界产生不规则表面的结果,描述自然界分形现象的最好模型是分形布朗运动 (FBM)。将图像灰度看作一个凹凸不平的曲面,图像的灰度适用于分形布朗运动原理。本文所采用的红外图像灰度符合分形的性质:

的值为 2。对于图像中的平滑区域,灰度值变化相对平稳,分形维数的理论值应在 $2 < D < 4$ 范围内,而对于图像中的细节区域,灰度值变化相对剧烈,分形维数将会超过理论值范围,即 $D > 4$ 或者 $D < 2$ ^[11]。

(3) 人眼灰度分辨能力

人眼对灰度的分辨能力如图 1 所示。灰度较高或较低的情况下,人眼对灰度的分辨能力较弱,而在图像灰度中等的条件下,人眼的分辨能力较强。例

如,在0灰度附近人眼仅能分辨出6个灰度等级,即人眼辨别不出0级灰度和1~5级灰度的差别,认为其是同一个灰度颜色。在32到191灰度时人眼的分辨能力较强,能够分辨出2个甚至1个灰度级,在255灰度附近,可分辨出3个灰度级。

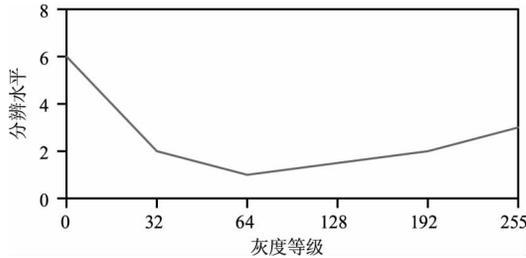


图1 人眼的灰度分辨能力

Fig.1 The grayscale resolution of human eyes

2.2 基于人眼频率特性的分形算法

(1) 基于人眼频率特性的频域滤波

首先,将图像 $I(x,y)$ 经过傅里叶变换得到其频谱图 $F(u,v)$,如2.1所述,频谱图上任意两点间经反变换均呈现一个正弦周期条纹,若两点间隔 N 个像素点,则明暗条纹重复 N 个周期。在人眼观察图像时,观察的对象不变,则人眼观察视角 α 为一定值,整个图像上呈现的周期数目为 N ,即为视觉内的条纹周期数。根据人眼对比度敏感函数,人眼敏感的空间频率值在1.3CPD~7.8CPD之间^[12],由以上结论可知,为了得到人眼敏感的细节图像,在设计带通滤波器时,可以通过人眼敏感的空间频率值及观察视角 α 来计算出频带宽度和频带中心。本文采用的是二阶巴特沃斯带通滤波器,频域滤波如式(5)所示:

$$F'(u,v) = H(u,v) \cdot F(u,v) \quad (5)$$

其中, $H(u,v)$ 为二阶巴特沃斯带通滤波器^[13],滤波函数如式(6)所示:

$$H(u,v) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{D(u,v) \cdot W}{D(u,v)^2 - D_0^2} \right)^{2n}} \quad (6)$$

式中, $D(u,v) = \sqrt{u^2 + v^2}$, n 为滤波器阶数,本文 n 取2, W 为频带宽度, $W = (7.8 - 1.3) \cdot \alpha$, D_0 为频带中心距频率中心的距离, $D_0 = \frac{(7.8 + 1.3)}{2} \cdot \alpha$ 。

经过傅里叶反变换后得到人眼敏感的细节图 $G(x,y)$:

$$G(x,y) = \mathcal{F}^{-1}(F'(u,v)) \quad (7)$$

最后通过大津阈值分割方法^[14]得到人眼敏感细节图 $G(x,y)$ 的最佳阈值 t ,由式(8)得到分割后的图像 $K(x,y)$ 如图2(d)所示,从而获取人眼敏感像素点的位置坐标:

$$K(x,y) = \begin{cases} 1, & G(x,y) \geq t \\ 0, & G(x,y) < t \end{cases} \quad (8)$$

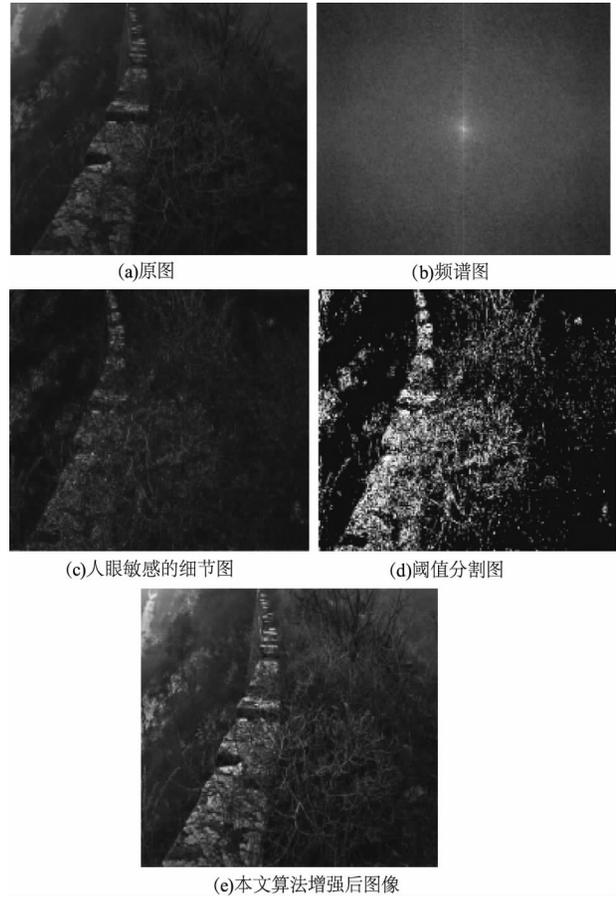


图2 频域滤波过程

Fig.2 The process of frequency filtering

(2) 改进的分形维数计算方法

根据2.1所述的分形维数理论,本文在计算红外图像 $I(x,y)$ 的分形维数时进行了细化,即设置一个 5×5 的矩形窗口 M ,如图3左图所示,该模板中心点为 (x_0, y_0) ,图3右图显示了除中心点外其余各点到中心点相对应的距离。

(x_0-2, y_0-2)	(x_0-2, y_0-1)	(x_0-2, y_0)	(x_0-2, y_0+1)	(x_0-2, y_0+2)	$2\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$2\sqrt{2}$
(x_0-1, y_0-2)	(x_0-1, y_0-1)	(x_0-1, y_0)	(x_0-1, y_0+1)	(x_0-1, y_0+2)	$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
(x_0, y_0-2)	(x_0, y_0-1)	(x_0, y_0)	(x_0, y_0+1)	(x_0, y_0+2)	2	1	0	1	2
(x_0+1, y_0-2)	(x_0+1, y_0-1)	(x_0+1, y_0)	(x_0+1, y_0+1)	(x_0+1, y_0+2)	$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
(x_0+2, y_0-2)	(x_0+2, y_0-1)	(x_0+2, y_0)	(x_0+2, y_0+1)	(x_0+2, y_0+2)	$2\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$2\sqrt{2}$

图3 分形维 5×5 窗口算法示意图

Fig.3 The 5×5 windows of fractal dimension algorithm

之后经矩形窗口在图像中的滑动以及公式(4)求得像素点的分形维数 $D(x, y)$ 。公式(3)中 r 有四种取值,即: $r_0 = 1$ 、 $r_1 = \sqrt{2}$ 、 $r_2 = \sqrt{5}$ 、 $r_3 = 2\sqrt{2}$ 、 $r_4 = 2$,因此,在求像素点的分形参数时,应考虑到 r 的四种不同取值情况, H_n 的取值如式(9)所示:

$$H_n = \log \frac{1}{N_{r=r_n}} \sum_{r=r_n} |I(x, y) - I(x_0, y_0)| \quad (n = 0, 1, \dots, 4) \quad (9)$$

最后计算出 4 种情况下求出的分形参数平均值,如式(10)所示,这样求出的分形参数值更加精确。最后根据式(4)求出红外图像像素点的分形维数。

$$H = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{H_1 - H_0}{\log \sqrt{2}} + \frac{H_2 - H_0}{\log 2} + \frac{H_3 - H_0}{\log \sqrt{5}} + \frac{H_4 - H_0}{\log 2\sqrt{2}} \right) \quad (10)$$

结合大津阈值分割后得到的人眼敏感像素点的位置坐标以及每个像素点的分形维数就可以对红外图像进行细节增强,即针对人眼敏感并且超过分形维数理论值的像素点进行增强。图像中像素点位于平滑区域时,分形维数的值应在理论值 $2 < D < 4$ 范围之内,对于平滑区域我们可以选用较小的权值进行背景增强,若图像中像素点位于边缘区域,分形维数将会超过理论值范围,即 $D > 4$ 或者 $D < 2$,针对人眼敏感的细节边缘区域我们可以利用人眼对灰度的分辨能力进行增强。

(3) 基于人眼灰度分辨特性的图像增强新方法

根据人眼的灰度分辨特性,在图像增强时,可将灰度等级分为五个区域: $0 \leq I(x, y) < 32$ 、 $32 \leq I(x, y) < 64$ 、 $64 \leq I(x, y) < 192$ 、 $192 \leq I(x, y) < 220$ 、 $220 \leq I(x, y) < 256$ 。为了适应人眼观察,首先对图像中的平滑区域进行一定程度的增强处理,现假设平滑区域处的增强权值为 α (本文取 1.15);其次,为突出边缘等细节区域,增加该区域与平滑区域的对比度,则应在平滑区域进行增强后,再依据人眼的灰度分辨特性,得到每个灰度区域内对应的细节点增强数值。

本文选取 $\alpha = 1.15$, 设 $G(x, y) = \alpha \cdot I(x, y)$, 在图像细节边缘区域应满足 $2 < D < 4$ 且 $K(x, y) = 1$, 最终增强的图像 $S(x, y)$ 为(如图 2(e)所示):

$$S(x, y) = \begin{cases} \lceil -\frac{1}{8} \cdot G(x, y) + 6 \rceil & 0 \leq G(x, y) < 32 \\ \lceil -\frac{1}{32} \cdot G(x, y) + 3 \rceil & 32 \leq G(x, y) < 64 \\ \lceil \frac{1}{128} \cdot G(x, y) + 0.5 \rceil & 64 \leq G(x, y) < 192 \\ \lceil \frac{1}{63} \cdot G(x, y) - \frac{22}{21} \rceil & 192 \leq G(x, y) < 220 \\ 255 & 220 \leq G(x, y) < 256 \\ G(x, y) & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

该增强方法充分考虑了人眼的视觉特性,基于人眼灰度曲线上的不同分辨能力,在灰度等级上进行非线性变换,增强曲线如图 4 所示,使增强后的红外图像能够更好地为人眼所观察。

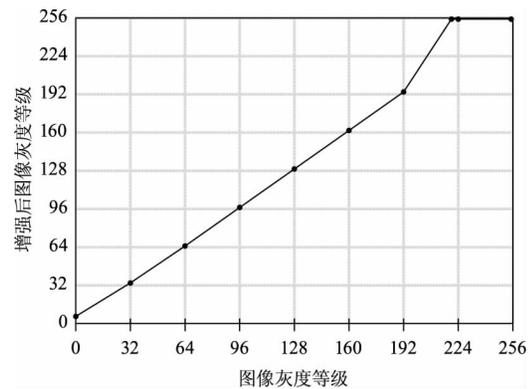


图 4 灰度的非线性变换

Fig. 4 The nonlinear transformation of gray scale

基于以上研究内容,本文所提算法的流程如图 5 所示。

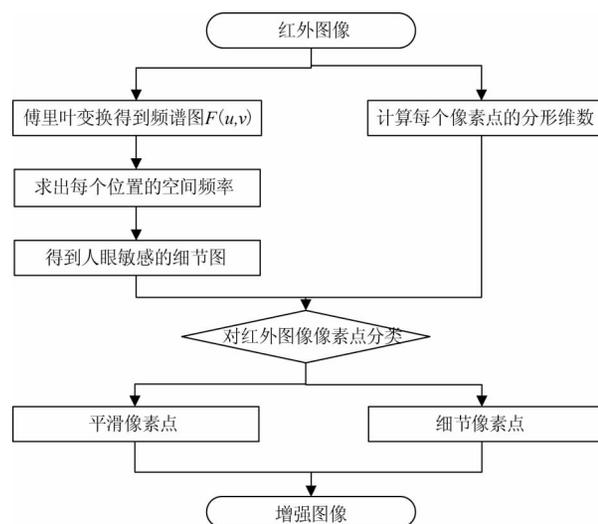


图 5 算法流程图

Fig. 5 The algorithm flow chart

3 实验与分析

选取 Oklahoma State University 的“Terravic Research

Infrared Database”作为本文的红外图像库,以 Retinex 多尺度中心环绕算法(MSR)为标准算法,再分别使用本文提出的算法、分形小波算法以及小波算法对图像进行增强,通过与标准算法的比较,得出实验结论。除采用已知数据库外,本文还选用了其他一些边缘较为丰富的红外图像来验证所提算法的可靠性如图 6 所示。

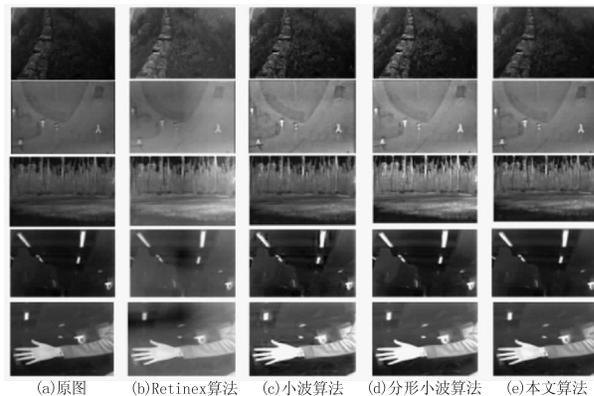


图 6 实验红外图像结果

Fig. 6 The experimental results of infrared images

如图 6 所示,(a)为原红外图像,由图可见红外图像对比度不高,树枝边缘模糊,图像较暗,不利于人眼观察;(b)为 Retinex 多尺度中心环绕算法增强后的图像,增强后的图像亮度和对比度明显提高,图像的细节信息得到提升,但图像存在着灰度级不均匀,细节特征不突出的问题;(c)为单独使用小波算法增强后的图像,小波基选用的是 symlets 函数,可以看到增强后的图像细节清晰,灰度分布均匀;(d)为分形算法与小波增强结合后的效果图,图像边缘轮廓虽然也得到了增强,但有些部分产生了过增强现象;(e)为基于人眼频率特性的分形算法增强后的图像,人眼所感兴趣的边缘细节被完全检测出来,树的枝杈更加清晰,整幅图像灰度均匀,达到了更好的视觉效果,主观上其增强效果与(c)类似,因此仍需结合客观分析来得出最优算法。

图像增强中常用峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)、运算时间(单位为秒)作为衡量图像质量的重要指标^[15],表 1 中显示了不同算法处理后的图像的峰值信噪比、均方误差、平均运算时间,并且以 Retinex 多尺度中心环绕算法的指标值为基准,分别计算基于人眼频率特性的分形算法、分形小波算法和小波增强算法的各个指标值占标准算法指标值的百分比。

表 1 4 种算法处理后的客观评价指标

Tab. 1 The objective evaluation index of four algorithms

算法指标	Retinex 算法	小波算法	分形小波算法	本文算法
PSNR	17.77(100%)	180.67%	152.35%	192.13%
MSE	3803.4(100%)	25.81%	40.38%	18.27%
运算时间/s	0.89	1.16	2.65	1.98

以上实验的运行环境为 Windows10,处理器为酷睿 i5-4590@3.30GHz。由表 1 可知,本文提出的基于人眼频率特性的分形算法在 MSE、PSNR 指标上要优于其他算法(PSNR 指标越大越好,MSE 值越小越好),但运算时间不是最优的,在频域滤波过程中,傅里叶正反变换的运算量较大,因此本文算法在运算速度上要低于 Retinex 算法以及小波增强算法。

综合主客观分析,本文所提出的基于人眼频率特性的分形算法优于其他几种增强算法,从而在应用中更利于后续的分析。

4 结 语

传统的红外图像增强算法,往往只关注图像本身的特征,忽视了作为观察主体——人本身的视觉感受。因此,本文提出了基于人眼频率特性的分形增强算法,不仅利用了人眼感知的图像空间频率来获得人眼敏感的细节区域,还结合了红外图像像素点的分形参数,使得图像中的细节更加突出并且是利于人眼观察的。另外,人眼对于不同灰度范围的分辨能力不同,因而在对图像的平滑、细节区域分别进行增强时,还要结合此特性进行自适应的加权增强。本文提出的算法结合了人眼的视觉特性,具有针对性和适用性,使得增强后的图像对比度更强,并适合人眼观察。但该算法在去噪方面做得并不是很好,如何在抑制噪声的同时得到更加适合人眼观察的增强图像将在接下来的工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] WEN Haibing, BI Duyan, MA Shiping, et al. Halo-free and detail enhancement based on multi-scale retinex for infrared image [J]. Infrared Technology, 2016, (2): 149-156. (in Chinese)
温海滨,毕笃彦,马时平,等.消除光晕和细节增强的多尺度 Retinex 红外图像增强[J].红外技术,2016, (2):149-156.

- [2] LI Qingzhong, LIU Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, (2): 280 – 286. (in Chinese)
李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, (2): 280 – 286.
- [3] KIMMEL Ron, ELAD Michael, SHAKED Doron, et al. A variation framework for Retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7 – 23.
- [4] HAO Yu, WANG Xinsai, ZHANG Yanbo, et al. The infrared image enhancement algorithm based on adapted scale factor retinex [J]. Infrared Technology, 2016, 38(10): 855 – 859. (in Chinese)
郝宇, 王新赛, 张彦波, 等. 基于自适应尺度因子的 Retinex 红外图像增强算法[J]. 红外技术, 2016, 38(10): 855 – 859.
- [5] ZHAN Bichao, WU Yiquan, JI Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2788 – 2793. (in Chinese)
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788 – 2793.
- [6] Oliver C. Ibe. Brownian Motion [M]. Elsevier Inc., 2013: 263 – 293.
- [7] JIA Qi, LV Xuliang, WU Chao, et al. Research on infrared image enhancement based on human visual system [J]. Infrared Technology, 2010, 32(12): 708 – 712. (in Chinese)
贾其, 吕绪良, 吴超, 等. 基于人眼视觉特性的红外图像增强技术研究[J]. 红外技术, 2010, 32(12): 708 – 712.
- [8] DENG Peizhuang. The calculation method of filter space frequency based on visual characteristics of human eyes and its application in color image. Computer Knowledge and Technology, 2014, (16): 3893 – 3895. (in Chinese)
邓培状. 基于人眼视觉特性的滤波器空间频率的计算方法及其在彩色图像上的应用[J]. 电脑知识与技术, 2014, (16): 3893 – 3895.
- [9] David M Mackie, Justin P Jahnke, Marcus S Benyamin, et al. Simple, fast, and accurate methodology for quantitative analysis using Fourier transform infrared spectroscopy, with bio – hybrid fuel cell examples [J]. MethodsX, 2016.
- [10] B Mandelbrot. Fractal geometry of nature [M]. New York: W. H. Freeman, 1999: 425 – 443.
- [11] HAO Yan. Research on fractal dimension characteristics and methodology of fractal fault diagnosis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
郝研. 分形维数特性分析及故障诊断分形方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] LI Yi. Research on technology of infrared image enhancement based on human visual model [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences), 2016. (in Chinese)
李毅. 基于视觉模型的红外图像增强技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [13] Lin Du, Fei Lei Jia. Controlling chaos by bounded self-controlling function using butterworth filter feedback [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, (541 – 542): 1216 – 1221.
- [14] YANG Shuhong. Study on the adaptive and fast algorithm of gray scale image thresholding [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
阳树洪. 灰度图像阈值分割的自适应和快速算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [15] DAI Shaosheng, XU Hong, LIU Qin, et al. Infrared image enhancement algorithm based on human visual properties [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, (1): 115 – 118. (in Chinese)
代少升, 徐洪, 刘琴, 等. 基于人眼视觉特性的红外图像增强算法 [J]. 半导体光电, 2016, (1): 115 – 118.