文章编号:1001-5078(2017)01-0047-06 ·红外技术及应用·

基于改进高低帽变换的钢轨裂纹红外图像增强

顾桂梅,刘 丽
(兰州交通大学自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:针对钢轨裂纹红外图像对比度低、信噪比低、纹理细节模糊而难以增强目标区域的问题,借助形态学高帽变换和低帽变换,提出了多尺度高帽低帽变换的钢轨裂纹红外图像增强优化算法。首先,用改进高帽变换、低帽变换分别提取多尺度明亮、暗淡图像区域;其次对多尺度的明亮与暗淡图像区域实施最大值的提取;然后操作其最大值以构建明亮和暗淡的图像区域;最后通过加权处理,实现图像增强。实验结果表明:本文算法在抑制噪声和突出了目标图像的边缘的基础上,有效地提高图像对比度,可应用于红外图像增强的场合,为后续图像信息处理奠定了必要的基础。

关键词:钢轨裂纹;红外图像;图像增强;高帽变换
中图分类号:TP391;U213.4 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.01.009

Infrared image enhancement of rail crack based on improved top-hat and bottom-hat transformation

GU Gui-mei,LIU li
(School of Automation and Electrical Engineering,Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China)

Abstract:As the infrared image of rail crack has low contrast,low signal-noise ratio,fuzzy texture detail and is difficult to enhance the target region,an infrared image enhancement optimization algorithm of rail crack based on the multi-scale top-hat and bottom-hat transformation is proposed. First,an improved top-hat transform is used to extract multi-scale bright image regions,and multi-scale dim image regions is extracted using an improved bottom-hat transform;then the bright and dark areas of the image are established through the maximum value extracted from the multi-scale bright and dim image regions;finally,image enhancement is realized through weighted processing. Experimental results indicate that the proposed algorithm can suppress the noise and highlight image edge of the target,meanwhile effectively improve the image contrast,which lays a necessary foundation for the further image processing.

Key words:rail crack;infrared image;image enhancement;top-hat transformation

1 引 言

钢轨是铁路线路轮轨接触系统中尤为重要的部件,起着引导列车行驶和在列车运行过程中直接承受复杂车辆载荷的重要作用,其伤损情况将直接影响到铁路运输中列车的安全稳定运行。因此,能否快速、精准地检测出亚表面的钢轨裂纹并准确地判定出裂纹的扩展深度有助于铁路工务部门及时修复损伤、延长钢轨使用寿命、降低维修成本和伤损积累

基金项目:甘肃省科技计划项目(1508KJZA059)资助。
作者简介:顾桂梅(1970-),女,教授,主要从事智能监测和故障监测与诊断及智能信息处理等方面研究。
通讯作者:刘 丽(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外无损检测,图像处理。E-mail:persue1990@163.com
收稿日期:2016-04-19;**修订日期**:2016-07-01

的程度。

红外热波检测是一种利用物体热辐射现象进行的非接触式无损检测方法,其基本过程为:首先,采用可控激励热源加热待检测钢轨,然后,依靠红外热像仪持续摄取待测钢轨温度场的分布及其变化,即通过表面温度场的分布形式来表达钢轨的内部伤损情况,最后,在对摄取的热像图进行处理和分析基础上完成结构缺陷或损伤的位置、大小及深度等信息的判定,从而实现对结构内部缺陷的检测[1]。而为了进一步判定出钢轨的具体损伤程度时,则需要对红外图像做分割处理,即将钢轨缺陷位置最大扩展深度的区域分割出来,然后将其与该位置区域的温度场分布情况结合起来,以达到裂纹深度定量计算的目的[2]。

目前,图像增强方法主要有数学形态学[3]、直方图均衡化[4]、偏微分方程[5]、小波变换[6]、Curvelet 变换及 Contourlet 变换[7]等方法。具有非线性特性的数学形态学方法,在图像处理领域逐渐得到日益多的关注,蔡友杰等[8]提出的假高帽变换与多尺度结构元素相结合的方法,有效改善了边缘提取效果,但这种方法仅仅偏重于提取暗背景上的亮物体。朱士虎等[9]将假高帽变换的概念和低帽变换的新方法应用于亮背景上暗物体的提取,有效地抑制噪声,边缘清晰准确,在增强图像内部的微小细节纹理方面有了很大的改善。而形态学中提出的 Top-hat 算子有增大图像灰度值范围、抑制杂波背景及提取图像特征的能力,但在实际运算时 Top-hat 算子不能有效地增强图像细节,精度也不高,为此,本文提出了基于多尺度高帽低帽变换的钢轨裂纹红外图像增强算法。

2 传统的高帽变换与低帽变换

数学形态学(Mathematical Morphology)的基本思想是利用一个探针(结构元素)去探测图像,保留其主要形状,剔除不相干形状(如噪声、毛刺)[10],以此来达到图像分析和识别的目的。可以构造不同形状(如圆盘形、矩形、六边形、菱形等)的结构元素,以便从图像中提取各种不同的信息,不同的结构元素和形态学算子可以获得目标的大小、形状、连通性和方向性等信息。

2.1 形态学基本运算

在图像处理中,运用的数学形态学最基本运算是膨胀和腐蚀,和由此组合构成的新运算:开运算、闭运算、Top-hat 等。

设 $f(x,y)$ 是输入灰度图像,$B(u,v)$ 为结构元素,则:

1)灰度膨胀

$$(f\oplus B)(x,y)=\max_{u,v}\{f(a,b)+B(u,v)\mid(a,b)\in D_f,(u,v)\in D_B\} \tag{1}$$

2)灰度腐蚀

$$(f\Theta B)(x,y)=\min_{u,v}\{f(c,d)-B(u,v)\mid(c,d)\in D_f,(u,v)\in D_B\} \tag{2}$$

式中,D_f 为灰度图像 $f(x,y)$ 的定义域;D_B 为结构元素 $B(u,v)$ 的定义域;$a=x-u$;$b=y-v$;$c=x+u$;$d=y+v$。

3)灰度开运算

$$(f\circ B)(x,y)=(f\Theta B)\oplus B \tag{3}$$

4)灰度闭运算

$$(f\cdot B)(x,y)=(f\oplus B)\Theta B \tag{4}$$

2.2 高帽变换与低帽变换

学者 Meyer 运用开运算算子和闭运算算子提出了高帽变换算子,高帽(Top-hat)变换运算是指原图像与它的开运算结果之差;相应地,低帽(Bottom-hat)变换运算则是图像的闭运算结果与原图像之差,高帽变换和低帽变换定义如式(5)和式(6)所示:

1)高帽变换

$$\mathrm{TH}(x,y)=f(x,y)-(f\circ B)(x,y) \tag{5}$$

2)低帽变换

$$\mathrm{BH}(x,y)=(f\cdot B)(x,y)-f(x,y) \tag{6}$$

高帽变换具有高通滤波的某些特性,可以求解出目标的灰度峰值,使得边缘信息得到增强,用来提取明亮图像区域;相应地,谷值可通过低帽变换求得,它强调目标间相互连接的界限,用来提取暗淡图像区域[9,11]。故结合使用高帽变换算子和低帽变换算子,可以进一步拉伸图像前景和背景间的灰度以及突显相关目标和细节,起到图像增强的作用。

3 改进的多尺度高帽低帽变换优化算法

3.1 多尺度高帽低帽变换优化算法的提出

多尺度数学形态学在图像增强方面有着重要作

用。其中,正方形形状是普遍使用的结构元素形状之一,如图 1 所示,结构元素 B_b 的尺寸大小用 n_L 来表示,n_W 是表示边缘结构元素 ΔB 的尺寸大小,而 ΔB 里的边缘大小用 n_M 表示。基于 B_b 和 ΔB,通过改进高帽、低帽变换可提取不大于 $(n_W - 2 \times n_M)$ 尺寸的明亮或暗淡图像区域。

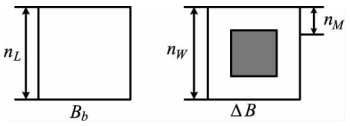

图 1　正方形形状的结构元素

Fig. 1 A square shaped structure element

假设使用含有 n 个尺度的结构元素,逐渐改变它在每个尺度 $i(1 \leqslant i \leqslant n)$ 上的大小,如式(7)和式(8)所示:

$$nL_i = nL + i \times nS \tag{7}$$

$$nW_i = nW + i \times nS \tag{8}$$

其中,nS 表示的是每个尺寸的增长步长。

运用结构元素 $B_i(u,v)(0 \leqslant i \leqslant n-1)$,式(1)~(6)可表示成式(9)~(14)所示。

$$(f \oplus B_i)(x,y) = \max_{u,v}\{f(a,b) + B_i(u,v)\} \tag{9}$$

$$(f \Theta B_i)(x,y) = \min_{u,v}\{f(c,d) - B_i(u,v)\} \tag{10}$$

$$(f \circ B_i)(x,y) = (f \Theta B_i) \oplus B_i \tag{11}$$

$$(f \cdot B_i)(x,y) = (f \oplus B_i) \Theta B_i \tag{12}$$

$$\mathrm{TH}_i(x,y) = f(x,y) - (f \circ B_i)(x,y) \tag{13}$$

$$\mathrm{BH}_i(x,y) = (f \cdot B_i)(x,y) - f(x,y) \tag{14}$$

式中,$a = x - u$,$b = y - v$,$c = x + u$,$d = y + v$。

改进的高帽、低帽变换中采用了两个相同形状的平坦结构元素,即小于等于目标区域尺寸的 B_{out} 和大于等于目标区域尺寸的 B_{in}。令边缘结构元素 $\Delta B = B_{out} - B_{in}$,令满足条件 $B_{in} \leqslant B_b \leqslant B_{out}$ 的目标区域中的结构元素为 B_b。利用 B_b 和 ΔB,如式(15)和式(16)所示,提出 $f \diamond B_{oi}$ 和 $f \blacklozenge B_{oi}$ 两种新算子。

$$f \diamond B_{oi}(x,y) = (f \Theta \Delta B) \oplus B_b \tag{15}$$

$$f \blacklozenge B_{oi}(x,y) = (f \oplus \Delta B) \Theta B_b \tag{16}$$

基于 $f \diamond B_{oi}$ 和 $f \blacklozenge B_{oi}$,同时结合多尺度理论,优化传统的高帽、低帽变换,提出了改进的高帽(NTH)、低帽变换(NBH),分别如式(17)和式(18)所示。

$$\begin{aligned}\mathrm{NTH}(x,y) &= \\ &\max\{f \diamond B_{oi}(x,y), f(x,y)\} - f(x,y) = \\ &\max\{(f \Theta \Delta B) \oplus B_b, f(x,y)\} - f(x,y)\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{NBH}(x,y) &= \\ &f(x,y) - \min\{f \blacklozenge B_{oi}(x,y), f(x,y)\} = \\ &f(x,y) - \min\{(f \oplus \Delta B) \Theta B_b, f(x,y)\}\end{aligned} \tag{18}$$

式中,nL_i 是 B_{bi} 的大小;nW_i 是 ΔB_i 的大小,可通过从 1 到 n 改变 i,提取出多尺度明亮、暗淡图像区域。

钢轨裂纹红外图像的明亮区域可以通过 NTH 来进行提取,暗淡区域可以通过 NBH 进行提取。由于含有边缘结构元素 ΔB 和目标区域中的结构元素 B_b,提升了 NTH 和 NBH 的区域提取性能。同时,负灰度值的抑制能够进一步消减一些噪声,更加有效地增强目标区域。

3.2　红外图像加权处理

如果采集到具有极少灰度级,且目标区域和背景两者间的对比度低的低质量红外图像。如式(19)所示,本文采用一种基于加权的对比度增强算法,可以对钢轨裂纹红外图像的对比度进行有效增强:

$$f_{En} = f \times \omega_1 + FT \times \omega_2 + FB \times \omega_3 \tag{19}$$

其中,f 表示的是灰度原始图像;f_{En} 表示的是对比度增强后的最终图像;ω_1,ω_2,ω_3 表示的是调整增强效果的权重。针对不同的应用要求,可以通过调整 ω_1,ω_2 和 ω_3 获得图像不同的对比度。

3.3　增强算法实现流程

综上,采用基于多尺度高帽低帽变换方法对钢轨裂纹红外图像进行增强的算法步骤如下:

(1)结构元素采用如图 1 所示的 4×4 正方形结构元素;

(2)依据公式(17)对原图像 $f(x,y)$ 提取多尺度明亮图像区域;

(3)根据公式(18)提取图像 $f(x,y)$ 的暗淡区域;

(4)参考式(20)提取多尺度明亮和暗淡图像区域上的最大值;

$$H = -\sum_{i=0}^{L-1} P_i 1bP_i \tag{20}$$

(5)将式(19)作用到第(4)步提取的明亮和暗淡图像区域,从而实现图像增强。

该算法的执行过程框图如图 2 所示。

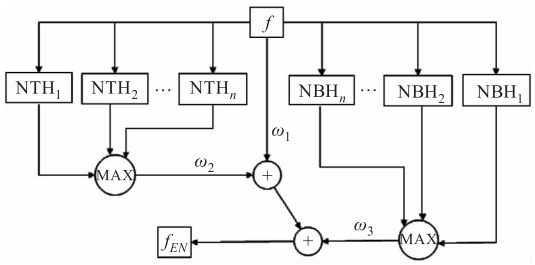

图 2 改进算法的执行过程框图

Fig. 2 The execution block diagram of improved algorithm

4 实验结果及分析

4.1 红外图像的采集

在兰州铁路局中卫工务段钢轨探伤车间,搭建主动式红外热波检测系统实验平台,如图 3 所示。选取型号为 MAG30 红外热像仪连续记录钢轨裂纹处温度的变化,由热像仪自带的 ThermoX 在线式图像采集软件输出不同时刻的红外图像序列,从采集的红外热波图像序列中选取一帧效果最好的热图像,如图 4 所示。

图 3 热波探伤系统实验平台照片

Fig. 3 experimental platform photo of infrared thermal wave detection system

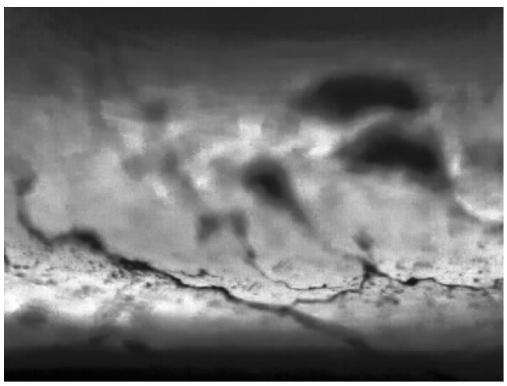

图 4 裂纹红外图像

Fig. 4 crack infrared image

4.2 实验结果与定性分析

图 5(a)所示为灰度原图像,增强处理的实验结果如图 5 (b) ~ 图 5 (f)所示。

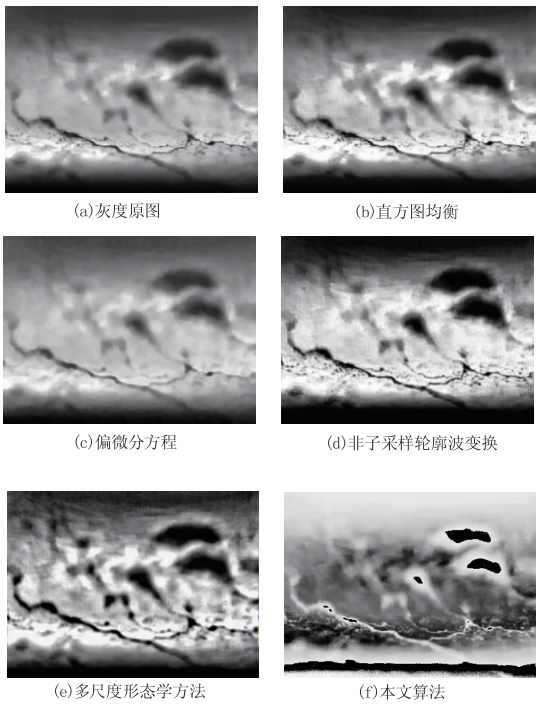

图 5 钢轨裂纹红外图像的增强结果

Fig. 5 enhancement results of rail crack infrared image

图 5(b)中可看出经过 HE 后的红外图像,整体亮度有些许改善,裂纹细节未被增强,两侧的麻点剥落噪声被放大了,使图像显得有些“过亮”;图 5(c)为偏微分方程后的红外图像,图像整体清晰度有所下降,裂纹内部细节纹理被增强,但边缘被弱化较严重;图 5(d)为 NSCT 后的图像,增强模糊边缘的同时避免损伤清晰边的图像,增强模糊边缘的同时避免损伤清晰边裂纹边缘对比度有明显的提高,缺乏噪声抑制,出现“过增强”现象;图 5(f)为采用本文算法处理后得到的图像,从该图能够看出,经过基于多尺度高帽低帽变换的方法对钢轨裂纹红外图像增强后图像整体更加清晰,钢轨裂纹边缘的对比度提高效果非常显著,同时,对灰度相近且微弱细节纹理信息增强效果明显。

4.3 实验结果定量分析

线性模糊性指数量度[12]、清晰度[13]和标准差[14]是定量比较分析红外图像增强效果的常用参数,通过计算上述三种参数值的大小,进而定量分析各个算法的增强性能。设 $f(x,y)$ 为图像中各个位置的像素值,图像大小为 $M \times N$, 则:

1) 线性模糊性指数量度

$$\gamma(f_{En}) = \frac{2}{mn}\sum_{x=1}^{m}\sum_{y=1}^{n}\min\{p_{xy},(1-p_{xy})\}$$

其中，$p_{xy} = \sin[\frac{\pi}{2} \times (1 - \frac{f(x,y)}{f_{\max}})]$ 为图像的像素；$f(x,y)$ 为像素 p_{xy} 的灰度值；$f_{\max}$ 是 $M \times N$ 的图像 f 的最大灰度值。

基于空间域分析的线性模糊性指数量度，可以定量比较不同增强算法对于图像的增强性能。γ 值越小，说明对应算法的增强性能越好。

2）清晰度（Definition）

$$\mathrm{Def} = \frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M-1}\sum_{n=1}^{N-1}\sqrt{[f(m+1,n) - f(m,n)]^2 + [f(m,n+1) - f(m,n)]^2}$$

图像整体的对比度以及局部的微小细节反差可以通过清晰度来反映，图像越清晰，则 Def 值越大。

3）标准差（Standard deviation）

$$\sigma_f = \left\{\frac{1}{MN}\sum_{x=1}^{M-1}\sum_{y=1}^{N-1}[f(x,y) - \bar{f}]^2\right\}^{\frac{1}{2}}$$

其中，$\bar{f}$ 表示的是图像的灰度均值。标准差值越大，则图像的灰度级分布会越分散，且图像的反差也相应越大，这表明目标图像中包含了更多的细节信息。

依据以上三种函数，各种算法增强效果的定量分析结果如表 1 所示。

表 1　图像增强效果定量比较

Tab. 1 Quantitative comparison of image enhancement effects

	原始图像	HE	PDE	NSCT	MSM	本文算法
γ	0. 8913	0. 5897	0. 8538	0. 4738	0. 4971	0. 3917
Def	6. 1473	8. 9153	5. 8239	9. 8136	9. 7566	11. 4781
σ_f	61. 3858	73. 9605	90. 0523	88. 0296	78. 2893	94. 6521

从表 1 可以看出，本文提出算法得到的图像性能指标均优于其他算法，说明该算法增强效果最好；MSM 算法的清晰度值大于直方图均衡化和偏微分方程，标准差的值相近，说明该算法增强了边缘对比度，却未能凸显细节纹理；而偏微分方程增强后，图像的标准差值较大，清晰度却与原图接近，这表明该算法在增强文理细节的同时会损害边缘对比度和图像的整体清晰度。本文算法兼顾裂纹边缘增强与细节纹理突出。

5　结　论

本文提出了基于多尺度高帽低帽变换的钢轨裂纹红外图像增强优化算法。采用改进高帽、低帽算子可实现增强图像细节，抑制图像噪声的目的，视觉效果较好；本文算法引入两个结构元素，即边缘结构元素和目标区域中的结构元素，能够实现不同程度的细节增强，且有较好的边缘分辨能力；基于加权的对比度增强算法可实现图像对比度针对不同的应用情况而改变。实验结果表明，所提算法对钢轨裂纹红外图像有较为明显的增强效果，不仅能增强钢轨裂纹模糊边缘的对比度，而且能突显钢轨裂纹内部的纹理细节信息，同时可较好地抑制图像中的背景噪声。为后续特征像素点的取取和计算特征像素点处的深度奠定了基础，具有较广泛的应用价值。

参考文献：

[1] LI Meihua, ZENG Zhi, SHEN Jingling, et al. Numerrical simulation of defects depth quantitation measurement in pulsed infrared nondestructive testing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 875 – 879. (in Chinese)
李美华，曾智，沈京玲，等. 脉冲红外无损检测缺陷深度定量测量的数值模拟[J]. 红外与激光工程，2013，42(4)：875 – 879.

[2] HUANG Tao, GU Guimei. Research on processing algorithms of infrared thermal image containing crack defect [J]. Infrared Technology, 2014, 36(9): 732 – 736. (in Chinese)
黄涛，顾桂梅. 含裂纹缺陷的红外热图像处理算法研究[J]. 红外技术，2014，36(9)：732 – 736.

[3] ZHANG Yanling, LIU Guixiong, CAO Dong, et al. Basic operators of mathematical morphology and application in image preprocessing[J]. Science Technology and Engineering, 2007, (3): 356 – 359. (in Chinese)
张艳玲，刘桂雄，曹东，等. 数学形态学的基本算法及在图像预处理中应用[J]. 科学技术与工程，2007，(3)：356 – 359.

[4] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Trans. on image processing, 2000, 9(5): 889.

[5] HAN Xizhen, ZHAO Jian. Enhancemen of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1382 – 1387. (in Chinese)
韩希珍，赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. 光学 精密工程，2012，20(6)：1382 – 1387.

[6] QIN Hanlin, ZHOU Huixin, LIU Shangqian, et al. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 354 – 356. (in Chinese)
秦翰林，周慧鑫，刘上乾，等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报，2009，29 (2)：354 – 356.

[7] PENG Zhou, ZHAO Baojun. Novel scheme for infrared image enhancement based on Contourlet transform and fuzzy theory[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 635 – 640. (in Chinese)
彭洲,赵保军. 基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外图像增强算法[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 635 – 640.

[8] CAI Youjie, CHEN Xiuhong. The edge detection based on morphology[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(5): 213 – 2 15. (in Chinese)
蔡友杰,陈秀红. 基于形态学的边缘检测[J]. 计算机应用与软件,2009,26(5):213 – 215.

[9] ZHU Shihu. Function extension and application of morphological top-hat and bottom-hat transformation[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(34): 190 – 192. (in Chinese)
朱士虎. 形态学高帽变换与低帽变换功能扩展及应用[J]. 计算机工程与应用,2011,47(34):190 – 192.

[10] JU Cunyong, CAI Tijiu, FENG Zhongke. Automatic segmentation of high-resolution remote sensing image based on mathematical morphology and maximum likelihood estimate[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(Supp. 2): 84 – 87. (in Chinese)
琚存勇,蔡体久,冯仲科. 基于数学形态学和最大似然法的遥感图像分类研究[J]. 北京林业大学学报, 2005,27(增刊 2):84 – 87.

[11] ZHANG Junsheng, HOU Huiling, ZHAO Xiaoxia. A modified otsu segmentation algorithm based on preprocessing by Top-hat transformation[J]. Sensor World, 2011, 17(12): 9 – 11. (in Chinese)
张俊生,侯慧玲,赵晓霞. 基于高帽变换预处理 Otsu 分割算法[J]. 传感器世界,2011,17(12):9 – 11.

[12] LIU Li, JIN Hong, TANG Bo, et al. Infrared image enhancement optimitation algorithm based on multi-scale top-hat transformation[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(3): 66 – 69. (in Chinese)
刘莉,靳鸿,唐波,等. 多尺度高帽变换的红外图像增强优化算法[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(3): 66 – 69.

[13] HE Li, QU Shiru, ZHANG Daqi. Image enhancement based on inter-scale correlations of nonsubsampled Contourlet coefficients[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(1): 42 – 44. (in Chinese)
何力,曲仕茹,张大奇. 基于非下采样 Contourlet 系数尺度相关性的图像增强算法[J]. 西北工业大学学报, 2010,28(1):42 – 44.

[14] GU Guimei, HUANG Tao. Rail crack infrared image enhancement based on adaptive multiscale products thresholding[J]. Journal of The China Railway Society, 2015, 37(2): 58 – 63. (in Chinese)
顾桂梅,黄涛. 基于自适应多尺度积阈值的钢轨裂纹红外图像增强[J]. 铁道学报,2015,37(2):58 – 63.

[15] ZHANG Xiangyu, YANG Yuxiao. Infrared image processing method based on C – V model and mathematical morphologe[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(1): 30 – 34. (in Chinese)
张翔宇,杨玉孝. C – V 模型和数学形态学的红外图像处理方法[J]. 激光与红外,2014,44(1):30 – 34.