

〈综述与评论〉

红外图像质量的提升技术综述

凡遵林^{1,2}, 管乃洋^{1,2}, 王之元^{1,2}, 苏龙飞^{1,2}

(1. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100073; 2. 天津(滨海)人工智能军民融合创新中心, 天津 300457)

摘要: 由于红外热成像仪成像原理的局限性和大气环境的干扰, 一般红外图像质量较低, 具体表现为: 空间分辨率低、对比度低、边缘模糊、细节缺失和易受噪声干扰等。本文从增强细节和边缘、提升图像对比度和抑制背景干扰3个方面, 综述了红外图像质量提升技术的研究现状, 并阐述了分析和提取图像低层结构是其发展趋势, 对其他图像处理领域具有一定的借鉴意义。

关键词: 红外图像质量提升技术; 细节和边缘增强; 对比度提升; 噪声抑制

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2019)10-0941-06

Infrared Image Quality Improvement Technology: a Review

FAN Zunlin^{1,2}, GUAN Naiyang^{1,2}, WANG Zhiyuan^{1,2}, SU Longfei^{1,2}

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100073, China;

2. Tianjin Artificial Intelligence Innovation Center, Tianjin 300457, China)

Abstract: As the principle of thermal imager and the interferences atmospheric environment, general infrared images suffer from inferior image qualities including low spatial resolution, low image contrast, blurred edges, detail loss and disturbances due to background noise. Therefore, to enhance details and edges, improve image contrast and suppress background interference, we review the research status of infrared image quality improvement technology and expound that analyzing and extracting low-level structure of image is its development trend in this paper. This review can be used as a reference in other areas of image processing.

Key words: infrared image quality improvement technology, detail and edge enhancement, contrast enhancement, noise suppression

0 引言

自然界中一切表面温度高于绝对零度(−273℃)的物体因内部的分子热运动而随时随地向空间发出红外热辐射。红外热成像技术也成为了当前各国的研究重点, 尤其在国防军事领域。红外热成像仪具备以下成像优点^[1]: ①被动感应场景物体发射的红外辐射, 不容易被敌方探测; ②不依赖于外部光线的照射, 能不分昼夜接收场景红外辐射, 全天候工作; ③根据红外热辐射原理, 能降低部分物体对目标的遮挡或伪装; ④由于雨雪和烟雾对中远红外辐射是相对透明的, 受雨雪和烟雾影响较小; ⑤在复杂光照条件下(如局部强光或逆光), 能抓取场景的关键目标。

因此, 红外热成像仪被广泛应用到国防军事和民用工业各领域。红外热成像仪在军事领域的应用: 侦察、跟踪和识别敏感军事目标; 列装于导弹的制导系统, 实现武器的精确打击; 应用于军事港口, 全天候监测海面舰艇。在民用工业领域: 车载红外热成像仪能降低夜晚低可见度的影响和克服车灯造成的视觉干扰; 红外热成像诊断系统能检测电气设备内部温度异常和器件损坏等隐患; 在黑夜和恶劣条件下, 红外热成像仪可监控重点部门、辅助治安巡逻和防火警戒^[2]。但在红外热成像技术广泛的实际应用中存在红外图像质量较低的问题。场景物体和背景之间较小的温度差、红外热成像仪成像原理的局限性、大气环境的干扰和传输介质对红外辐射的衰减等, 导致了一般红外

收稿日期: 2018-07-23; 修订日期: 2018-08-16.

作者简介: 凡遵林(1991-), 男, 博士, 主要从事红外技术、光电图像处理和计算机视觉等方面的研究。E-mail: 18191261397@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金“基于对抗生成网络的雾霾图像复原方法研究”(61701524)。

图像存在空间相关性强、空间分辨率低、图像对比度较低、边缘模糊、细节缺失和易受噪声干扰等问题。

针对上述问题,国内外学者开展了一系列提升红外图像质量的研究^[3-5]。从算法发展的角度,提升红外图像质量算法包括非锐化掩模、基于直方图处理、高动态范围处理和同态滤波算法等传统处理算法,以及 Retinex 算法、伪彩色化算法、基于小波变换、后小波变换、形态学滤波和深度学习算法等新型处理算法。本文围绕增强红外图像细节和边缘、提升图像对比度和抑制背景干扰3个方面综述红外图像质量提升技术的研究现状。

1 红外图像质量提升技术的研究现状

1.1 增强细节和边缘

红外图像的细节和边缘增强是针对红外图像细节丢失和边缘模糊的问题,采取低层图像处理技术以增强细节和锐化目标边缘。分析图像灰度值的变化情况,细节和边缘分布在图像邻域内灰度值变化较明显的区域,属于图像频域较高的成分。增强图像细节和边缘算法的核心是保持或抑制图像低频成分同时放大图像高频成分,主要包括高频增强滤波器方法、广义非锐化掩模算法和 Retinex 算法。在图像处理中描述高频增强滤波器方法的数学表达式如下^[6]:

$$f_{\text{out}}(x, y) = f(x, y) + \alpha f_h(x, y) \quad (1)$$

式中: $f_{\text{out}}(x, y)$ 表示增强后的输出图像; $f_h(x, y)$ 表示高通滤波器提取的图像高频成分; α 表示控制增强程度的权重。直接采用高通滤波器提取图像高频成分,主要有拉普拉斯高通滤波器、梯度滤波器、Sobel 滤波器和巴特沃斯高通滤波器等。在原始图像基础上,高频增强滤波器方法采用适当放大高频成分,既可以保持原始图像光滑区域的灰度信息,又能锐化目标边缘和增强细节^[1]。

还有一种间接提取图像高频成分的方法:原始图像减去空间低通滤波获取的低频成分。在原始图像上叠加适当放大高频成分,达到图像细节增强和锐化边缘的目的。称间接获取高频成分的方法为非锐化掩模方法(unsharp masking, UM),其数学表达式如下^[7-9]:

$$f_{\text{out}}(x, y) = f(x, y) + \alpha(f(x, y) - f_l(x, y)) \quad (2)$$

式中: $f_l(x, y)$ 表示空间低通滤波器提取的低频成分; α 表示控制增强程度的权重。非锐化掩模算法具有简单易行的优点,且空间低通滤波方法的发展为非锐化掩模增强算法提供了坚实的理论基础。因此,不少研究者致力于研究和改进基于非锐化掩模的红外图像增强方法。

在非锐化掩模增强算法中,空间滤波器和增益权

重的选择对最终的增强效果至关重要。一方面,传统低通滤波器(如高斯滤波器)在平滑图像边缘过程中会出现过冲和欠冲的现象,导致增强后的图像出现梯度反转的问题。另一方面,图像的高频成分不仅包括图像的边缘和细节等有用信息,还包括背景噪声等无用信息。同时,图像邻域内细节和强边缘的灰度值变化不一致,对所有的高频成分使用相同的增益权重容易产生细节增强不明显或强边缘过度增强的现象。因此,为避免图像噪声放大和强边缘过度增强的问题,有必要选择非线性的增益权重。

为提升非锐化掩模算法性能,可以使用双边滤波器(bilateral filter, BF)^[10-12]和引导滤波器(guided image filter, GIF)^[13-15]等非线性滤波器代替高斯滤波器。针对非锐化掩模算法对噪声敏感和易过度增强边缘的问题,可以选择自适应的增益函数代替常数增益权重。A. Pulesel 采用最小化惩罚函数的手段有针对性地选择高频增益权重,增强图像细节同时抑制噪声的放大^[16]。

同时,保留放大图像高频成分以锐化边缘和增强细节的思路,把非锐化掩模算法中提取低频成分方式——空间平滑滤波,拓展为变换域或其他新型工具的方式,并将这类新型方法统称为广义非锐化掩模方法。常见变换域方法有小波变换、曲波变换、轮廓波变换和剪切波变换。基于形态学滤波的非锐化掩模增强算法是利用形态学的开运算和闭运算提取图像不同性质的成分从而有的放矢地放大,达到增强红外图像细节的目的。北京航空航天大学白相志教授团队在这方面取得显著成果^[17-19]。基于模糊集理论的图像增强算法则是将空间域图像转换到模糊域,根据模糊逻辑定义模糊域内像素点的隶属度,并根据隶属度数值进行相应的增强处理,最后返回至空间域得到细节增强后的图像^[20-21]。

增强红外图像细节算法还有一类典型代表——Retinex 算法。作为模拟人类视觉系统机制的数学模型,Retinex 模型认为人眼感知物体的亮度取决于物体的绝对亮度和场景的背景亮度,三者之间的关系定义如下:

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y) \quad (3)$$

式中: $L(x, y)$ 为照度分量且对应图像的低频成分; $R(x, y)$ 为目标表面的本质信息; $I(x, y)$ 为人眼感知的灰度图像。为求解目标表面的本质信息 $R(x, y)$, 对上式两边取对数,变乘号为加号。由于照度分量具有灰度变化缓慢的特性,采用低通滤波器估计对数域的照度分量,经过指数运算返回至空间域得到目标表面的本质信息。

Retinex 算法处理红外图像时具有很强的实际价值,因为不会出现增强彩色图像时颜色失真的现象。根据估计 Retinex 模型中照度分量的方法,总结 Retinex 算法如下:基于路径、中心环绕、偏微分方程和变分框架 4 类 Retinex 算法^[22-23]。空军工程大学的温海滨^[24]利用图像局部正则化先验求解 Retinex 模型:在分片常数先验、分段线性先验和分片可展先验的约束下分别解决传统 Retinex 模型增强红外图像细节时存在的边缘模糊、光晕伪影和阶梯效应的问题。

需要指出的是,虽然广义非锐化掩模模型和 Retinex 模型源于不同的理论,但是单纯从求解目的和估计手段上分析,两者具有较强的相似性。因此,可以将广义非锐化掩模增强算法的技巧推广至 Retinex 算法。

1.2 提升图像对比度

图像对比度是指灰度值从最暗到最亮的渐变层次,反映图像灰度值反差的大小。因此,提升图像对比度的直接思路是有目的地改变全局或局部像素点灰度值大小,增大图像灰度值的反差。提升图像对比度方法主要包括灰度值映射和基于直方图处理两大类算法。

灰度映射属于图像像素的点操作,即按照一定的映射规则将原始图像像素点的灰度值作为输入,根据映射规则输出灰度值。从数学角度理解灰度映射,将映射规则当作设定的函数,原始图像的灰度值和增强后图像的灰度值分别为函数的输入和输出。因此,灰度映射方法中映射规则的选择对最终提升对比度的效果具有重要意义。北京理工大学的刘斌^[25]使用伽马校正的方式提升红外图像对比度;西安交通大学的穆为磊^[26]根据人眼对灰度分辨率的韦伯比特性设计了灰度映射函数以提升对比度和改善视觉效果;嘉应学院的龚昌来^[27]根据图像灰度值大小将红外图像大致分成背景区、过渡区和目标区 3 类,采用正弦函数非线性地拉伸图像对比度,具有简单易行的特点。

直方图均衡算法是从统计学的观点,改变图像中灰度级的概率分布并使之均匀化,从而提高图像的对比度。这种全局的图像处理方法可以明显增大红外图像的灰度动态范围,但与此同时会带来两个明显缺点^[28]:①增强后图像的平均亮度与输入图像的亮度情况无关;②容易造成图像纹理区域细节丢失的问题。为此,有很多研究者提出改进直方图均衡的算法。可将改进直方图均衡的算法归纳为 3 类:①方程式改良类型:为使增强后的图像保持与原始图像相似的亮度特征,按照一定规则将整体直方图划分成几个子直方图,再均衡化每个子直方图;②概率密度函数

重塑类型:修改或限制原始图像的概率密度函数,使之满足预期的直方图概率密度函数,具有更强的普适性;③空间处理类型:为避免直方图均衡化过程中强边缘过度增强的现象,综合考虑图像像素点的物理位置和灰度值,采用自适应的局部直方图均衡,更好凸显了图像纹理区域的细节。

1.3 抑制背景干扰

红外图像的背景干扰主要包括一般情况的红外噪声和拍摄宽视角大景深场景(例如海面、天空等背景)红外图像的背景杂波^[29-31]。由于红外图像空间分辨率较低、红外焦平面阵列器件内部的电子热运动和外界环境光的影响,红外图像易受背景噪声的干扰。同时,这种随机噪声可以近似地认为是高斯随机噪声^[32-33]。

去除图像的高斯噪声在低层图像处理技术中占有重要位置,也经历了长期发展:从早期的高斯滤波到一系列改进的邻域滤波器,基于变换域的去噪方法,基于图像块特性的滤波器,再到近些年来兴起的基于深度学习的去噪网络。

为平滑图像背景的高斯噪声,高斯滤波器的思路是利用邻域内像素点灰度值的加权代替邻域中心像素点的灰度值。同时,依据邻域内相邻像素点与中心像素点之间物理位置的欧氏距离而定义的高斯模板。经证明,高斯滤波器本质上等效于各向同性的扩散过程,不具有根据像素点灰度值而改变扩散速率的能力。一方面,研究者们提出了很多各向异性的偏微分扩散方程,该类方法具有保持尖锐边缘和平滑图像的能力^[34-35]。或者加入正则化约束,利用变分方法最小化图像能量函数使去噪后图像的平坦区域处于平滑状态,而保持少数的图像边缘^[36]。另一方面,研究者们从空间邻域滤波器出发,考虑邻域像素点的灰度值对加权权重的影响。在高斯模板的基础上,考虑邻域相邻像素点与中心像素点之间灰度值欧氏距离,定义了双边滤波器的权重模板^[10-12]。Z. Farbman 采用加权最小二乘的优化方法求解以图像像素点梯度值为正则化约束的能量函数,获取保持边缘且滤除噪声的图像^[37]。类似地,L. Xu 等人在 2010 年提出了以像素点梯度值的 0 范数作为正则化约束的滤波器,比加权最小二乘滤波器具有更强保持边缘的能力^[38]。2010 年,K. He 等人定义在邻域内滤波后图像与引导图像呈线性关系的模型,根据引导图像的结构特征求解模型参数,计算相邻像素点对中心像素点的加权权重^[13]。

在变换域内抑制图像噪声的共同思路:先利用变换方法得到多尺度多方向的子带系数,再降低各子带系数的噪声水平,最后经过逆变换获取去噪后的空域

图像。由此可见,影响该类图像去噪方法效果的主要因素是变换方法和降低子带系数噪声水平的手段。目前,典型的变换方法有小波变换、脊波变换、曲波变换、轮廓波变换和剪切波变换,其中目前最优表示高维图像信号的方法是剪切波变换。降低噪声水平常用的手段有硬阈值去噪和自适应阈值去噪方法等。

非局部均值方法(non-local mean, NLM)属于早期利用图像块相似性滤除图像噪声的方法。其主要思想是在非局部的搜索框内计算图像块与目标图像块之间的相似性,并将该相似性作为图像块中心像素点的灰度值对目标图像块中心像素点的加权重^[39]。后续有不少改进较大的去噪算法,如三维块匹配算法(block-matching and 3 dimension, BM3D)^[40]和局部像素聚类的主成分分析(principal component analysis with local pixel grouping, LPG-PCA)^[41]。三维块匹配算法先寻找相似图像块组成三维数组并用硬阈值技术达到初步降低噪声的目的,再用维纳滤波对初步去噪的图像块与噪声图像块组成的两个三维数组进行二次滤波,最后返回至空间域得到最终的去噪结果。L. Zhang 在空间域内先对局部相似的图像块聚类,对不同类型的图像块分别进行主成分分析和抑制噪声操作,更新噪声水平再重复上述步骤得到去噪后的图像。同时,还有研究者利用图像块具有的稀疏特性和低秩特性抑制图像噪声,相继提出了 KSVD^[42]、KLLD^[43]和 RPCA^[44]等图像去噪算法。

利用深度学习网络具备强大的特征提取能力和端对端映射的简单易行特性,不少研究者提出了基于堆栈稀疏去噪自编码网络^[45-47]和深度卷积神经网络^[48-49]的图像去噪方法。使用端对端映射的学习方式,需要建立包含足够训练数据和真实标签的数据库。一般情况下,选择人为污染的图像作为网络输入端的训练数据,并将原始清晰图像作为真实标签以监督深度学习网络的训练过程。

抑制复杂背景下红外图像背景杂波的过程是检测和跟踪红外弱小目标前必不可少的预处理步骤。抑制背景杂波能有效提高红外图像的信噪比,提升检测和跟踪目标的准确率。最简单有效去除背景杂波对红外图像干扰的方式是先估计红外图像的背景图像,再利用原始图像与估计的背景图像之间的差分运算得到处理后增强图像^[50]。因此,从复杂背景中准确估计红外图像的杂波背景成为了解决该类问题的关键。其中,典型算法有中值滤波器、双边滤波器、二维最小均方误差算法、高斯带宽函数和形态学滤波等。值得一提的是,这种抑制红外图像杂波背景以提升图像对比度和信噪比的算法,与前文所提的广义非锐化掩模

算法的思想本质上是高度一致的。共同的关键是如何估计或提取各自所需的低频成分。

2 红外图像质量提升技术的发展趋势

接下来,从增强细节和边缘、提升图像对比度和抑制背景干扰3方面分析提升红外图像质量研究的关键技术和发展趋势。

1) 在增强红外图像细节和边缘算法中,广义非锐化掩模算法和 Retinex 算法的关键是提取原始图像的低频成分。一种既能滤除图像平坦区域的纹理和细节、又能很好保持原始图像显著边缘结构的滤波器,可以有效避免传统非锐化掩模算法增强结果的梯度反转效应和伪轮廓效应以及 Retinex 算法增强结果的光晕效应。因此,不管是空间域还是变换域的滤波器都需具备有针对性平滑图像结构的能力,而非各向同性的平滑作用。同时,一般红外图像中存在轻微的噪声干扰,在选择广义非锐化掩模算法的增益权重和 Retinex 算法的减弱系数均需要考虑红外图像的结构特征,不能同等地选择相同的系数处理所有像素点,否则难以避免噪声放大和强边缘过度增强的现象。因此,增强红外图像细节和边缘的关键技术是根据图像结构特征提取低频成分并自适应选择增强权重。

2) 在提升红外图像对比度算法中,传统的灰度映射算法和全局直方图均衡算法能有效提升图像的整体对比度,但处理后的图像仍存在局部对比度太低而导致细节丢失的问题。针对红外图像不同局部的背景亮度选择相应的映射关系是解决传统灰度映射算法弊端的关键。例如,考虑图像像素点位置和局部图像块灰度值统计特征,对比度受限自适应直方图均衡算法采用局部直方图均衡化的策略能有效提升图像的全局对比度和局部对比度,同时显著凸显图像的细节。因此,在提升红外图像对比度的过程中需要根据图像结构特征有针对性地提升图像的局部对比度。

3) 平滑图像噪声和保持图像结构是图像去噪滤波算法的一对矛盾。为防止处理后图像的细节和边缘等特征被过度平滑和继续残留噪声,需要考虑图像结构特征不同程度地滤除噪声或保持图像结构。总结空间邻域内抑制图像噪声滤波器的创新点:摒弃卷积核不变的滤波器,选择因图像块局部特征而改变加权重量的滤波器。基于变换域图像去噪方法的核心是利用变换方法的基函数最优提取图像的结构特征并在变换域中有效分离有用的结构特征和噪声成分。基于图像块特性的去噪方法则利用边缘处图像块的稀疏性或平坦区域图像块的低秩性而区分图像噪声。基于深度学习网络图像去噪算法的本质是利用卷积神经网络

网络的卷积层或堆栈稀疏去噪自编码器的编码层学习输入数据的结构特征而输出清晰无噪的图像。抑制红外弱小目标图像背景杂波的关键是估计红外图像的背景图像。如果估计的背景图像过于平滑,得到的目标图像仍然保留原始图像的背景杂波;相反的,估计的背景图像过于保留原始图像的背景杂波,得到的目标图像将丢失大部分的目标信息。因此,需要依据复杂背景下红外图像目标区域和杂波背景的结构特征,准确估计背景杂波。

综上所述,根据提升红外图像质量的需求,提取低层结构特征而有的放矢地处理红外图像是提升红外图像质量技术的关键,也是该领域的研究趋势。空间滤波器、变换域方法、直方图统计、稀疏表示模型、高斯混合模型、分形模型和马尔科夫模型等,这些基于统计学的方法在一定程度上都能提取图像结构特征。近十几年来,为完成目标检测、识别和跟踪等相关计算机视觉任务,模拟人类视觉系统感知外界过程的深度学习网络得到了蓬勃发展。同时,在大量训练数据的驱使下,深度学习网络可以有效学习输入数据与输出数据之间端对端的映射关系。从表面上看,深度学习网络与低层图像特征的提取并无明显的直接关系。但结合人眼视觉系统初级视觉皮质层特性的分析和深度学习网络模拟人类视觉系统的感知过程可知,深度学习网络的隐层神经元具有学习输入数据特征的特性。可以分析深度学习网络的隐层神经元学习输入数据的具体特征,并以此应用于红外图像低层结构特征的提取。因此,从技术手段上分析,可以采用基于统计学和数据驱动的方法提取红外图像的低层结构特征。

3 总结

由于目标和背景之间温度差较小、红外热成像原理和大气环境的干扰等影响,一般红外图像存在空间相关性强、空间分辨率低、图像对比度较低、边缘模糊、细节缺失和易受噪声干扰等问题。为充分发挥红外探测器的性能和拓宽红外热成像系统的应用,很有必要开展红外图像质量提升技术的研究。本文围绕增强红外图像细节和边缘、提升图像对比度和抑制背景干扰3个方面综述了红外图像质量提升技术的研究现状,分析了不同算法的关键技术,并阐述了低层图像结构特征提取和分析为该领域的发展趋势,为其他相关图像处理领域提供重要参考。

参考文献:

[1] James D. Thermal imaging systems modeling: present status and future challenges[C]//*Proceedings of SPIE*, 1994, **2269**: 538-550.

- [2] FANZ, BI D, GAO S, et al. Adaptive enhancement for infrared image using shearlet frame[J]. *Journal of Optics*, 2016, **18**: 085706.
- [3] FAN Z, BI D, DING W. Infrared image enhancement with learned features[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **86**: 44-51.
- [4] Janani V, Dinakaran M. Infrared image enhancement techniques - a review[C]//*IEEE International Conference on Current Trends in Engineering and Technology*, 2014: 167-173.
- [5] Morris N, Avidan S, Matusik W, et al. Statistics of infrared images[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007: 1-7.
- [6] Ramponi G, Polesel A. Rational unsharp masking[J]. *Journal of Electron Imaging*, 1998, **7**(2): 333-338.
- [7] Archana J, Aishwarya P. A review on the image sharpening algorithm using unsharp masking[J]. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016, **6**(7): 8729-8733.
- [8] FAN Z, BI D, XIONG L, et al. Infrared image enhancement based on novel multi-scale feature prior[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**: 043101.
- [9] Ferrari J, Flores J, Perciante C, et al. Edge enhancement and image equalization by unsharp masking using self-adaptive photochromic filters[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3570-3579.
- [10] ZUO C, CHEN Q, LIU N, et al. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(12): 127401.
- [11] Branchitta F, Diani M, Corsini G, et al. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(7): 076401.
- [12] Branchitta F, Diani M, Corsini G, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(9): 096401.
- [13] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[C]//*Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Springer Berlin, Heidelberg, 2011: 1-14.
- [14] Pham C, Ha S, Jeon J. Adaptive guided image filtering for sharpness enhancement and noise reduction [C]//*PSIVT 2011, Part I*, 2011, **7087**: 323-334.
- [15] LIU N, ZHAO D. Detail enhancement for high-dynamic-range infrared images based on guided image filter [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **67**: 138-147.
- [16] Ploesel A, Ramponi G, Mathews V. Image enhancement via adaptive unsharp masking[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **3**(9): 505-510.
- [17] BAI X. Morphological infrared image enhancement based on multi-scale sequential toggle operator using opening and closing as primitives[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **68**: 143-151.
- [18] BAI X. Microscopy mineral image enhancement through center operator construction[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**: 4678-4688.
- [19] BAI X, ZHOU F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(6): 2145-2156.
- [20] CHENG H, CHEN Y, SUN Y. A novel fuzzy entropy approach to image enhancement and thresholding[J]. *Signal Processing*, 1999, **75**(3):

- 277-301.
- [21] Hanmandlu M, Jha D. An optimal fuzzy system for color image enhancement[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(10): 2956-2966.
- [22] Morel J, Petro A, Sbert C. What is the right center/surround for Retinex?[C]//*IEEE International Conference on Image Processing*, 2014: 4552-4556.
- [23] CHEN Z, TAI S. Corrected center-surround retinex: application to tone reproduction for high dynamic range image [J]. *International Journal of Computers and Applications*, 2015, **37**(1): 37-51.
- [24] 温海滨. 基于局部正则先验的 Retinex 红外图像细节增强方法研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2017.
- WEN H. Research on infrared image enhancement with Retinex based on local regular prior [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2017.
- [25] 刘斌, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于空域和频域处理的红外图像细节增强算法[J]. *红外技术*, 2011, **33**(8): 477-482.
- LIU B, JIN W, WANG L, et al. Infrared image detail enhancement based on the spatial and frequency domain processing [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(8): 477-482.
- [26] 穆为磊, 高建民, 陈富民, 等. 符合人眼视觉特性的焊缝射线数字图像增强方法[J]. *西安交通大学学报*, 2012, **46**(3): 90-93.
- MU W, GAO J, CHEN F, et al. Weld radiographic image enhancement conforming to human visual system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, **46**(3): 90-93.
- [27] 龚昌来, 罗聪, 杨冬涛, 等. 基于正弦灰度变换的红外图像增强算法[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(2): 200-203.
- GONG C, LUO C, YANG D, et al. Infrared image enhancement based on sine gray level transformation[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(2): 200-203.
- [28] 凡遵林, 毕笃彦, 马时平, 等. 亮度保持和细节增强的红外图像增强方法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, **47**: 1967-1972.
- FAN Z, BI D, MA S, et al. Method for infrared image with brightness preservation and detail enhancement[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, **47**: 1967-1972.
- [29] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(19): 1083-1085.
- [30] ZHENG C, H. Li. Small infrared target detection based on harmonic and sparse matrix decomposition[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 066401.
- [31] ZHANG B, ZHANG T, CAO Z. Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106401.
- [32] FAN Z, BI D, HE L, et al. Noise suppression and details enhancement for infrared image via novel prior [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **84**: 44-52.
- [33] 唐麟, 刘琳, 苏君红. 红外图像噪声建模及仿真研究[J]. *红外技术*, 2014, **36**(7): 542-548.
- TANG L, LIU L, SU J. Modeling and simulation research of infrared image noise [J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(7): 542-548.
- [34] Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y. Forward-and-backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(7): 689-703.
- [35] Brox T, Weickert J. Nonlinear structure tensors[J]. *Image and Vision Computing*, 2006: 41-55.
- [36] Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y. Variational denoising of partly textured images by spatially varying constraints [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(8): 2281-2289.
- [37] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D, et al. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation[C]//*Proc. of ACM Siggraph*, 2008: DOI: 10.1145/1360612.1360666.
- [38] XU L, LU C, XU Y, et al. Image smoothing via L0 gradient minimization[C]//*ACM Trans. Graph*, 2010, **30**(6): 174.
- [39] Buades A, Coll B, Morel J. A non-local algorithm for image denoising[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005: 60-65.
- [40] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transaction on Optical Engineering*, 2007, **16**(8): 2080-2095.
- [41] ZHANG L, DONG W, ZHANG D, et al. Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping[J]. *Pattern Recognition*, 2010, **43**(4): 1531-1549.
- [42] Elad M, Aharon M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2006, **15**(12): 3736-3745.
- [43] Chatterjee P, Milanfar P. Clustering-based denoising with locally learned dictionaries[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2009, **18**(7): 1438-1451.
- [44] LIU G, LIN Z, YAN S, et al. Robust recovery of subspace structure by low-rank representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(1): 171-184.
- [45] Vincent P, Larochelle H, Lajoie I, et al. Stacked denoising autoencoders: learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2010, **11**(12): 3371-3408.
- [46] Burger H, Schuler C, Harmeling S. Image denoising: can plain neural networks compete with BM3D?[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012: 2392-2399.
- [47] FAN Z, BI D, HEL, et al. Low-level structure feature extraction for image processing via stacked sparse denoising autoencoder[J]. *Neurocomputing*, 2017, **243**: 12-20.
- [48] JAIN V, Seung H. Natural image denoising with convolutional networks[C]//*Proceedings of the 21st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2008: 769-776.
- [49] ZHANG K, ZUO W, CHEN Y, et al. Beyond a gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2017, **26**(7): 3142-3155.
- [50] FAN Z, BI D, HEL, et al. Dim infrared image enhancement based on convolutional neural network[J]. *Neurocomputing*, 2017, **272**: 396-404.