

引用格式: LI Jia, LI Shao-juan, DUAN Xiao-hu, *et al.* Infrared Image Enhancement Based on Retinex and Probability Nonlocal Means Filtering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0410003

李佳, 李少娟, 段小虎, 等. 基于 Retinex 理论与概率非局部均值的红外图像增强方法[J]. 光子学报, 2020, **49**(4):0410003

基于 Retinex 理论与概率非局部均值的 红外图像增强方法

李佳^{1,2}, 李少娟², 段小虎², 姚远², 李骥阳², 王立志²

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 空军工程大学 基础部, 西安 710051)

摘 要:针对传统红外图像增强算法中细节模糊及过度增强的问题,提出了一种基于 Retinex 理论与概率非局部均值相结合的红外图像增强方法.首先通过单尺度 Retinex 方法调整图像中过暗与过亮部分的灰度级;然后利用概率非局部均值对图像进行分解处理得到基本层与细节层,对基本层采用直方图均衡化拉伸对比度,对细节层采用非线性函数进行增强;最后,将不同层次的结果融合得到对比度与细节增强的红外图像.用该方法对多组不同场景的红外图像进行仿真实验,并将其与多种增强方法进行主、客观对比分析,结果表明所提方法在红外图像的细节及对对比度增强方面都获得了更好的效果.

关键词:红外图像;图像增强;Retinex 理论;概率非局部均值;各向异性扩散;对比度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204904.0410003

Infrared Image Enhancement Based on Retinex and Probability Nonlocal Means Filtering

LI Jia^{1,2}, LI Shao-juan², DUAN Xiao-hu², YAO Yuan², LI Ji-yang², WANG Li-zhi²

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Department of Basic, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aiming at the problem of over enhancement and low detailed in traditional image enhancement algorithm, an infrared image enhancement method based on Retinex theory and probability nonlocal mean is proposed. Firstly, the grayscale in deep dark and bright parts of image is adjusted by the single scale Retinex method. Then the image is decomposed into basic level and detail level by probability nonlocal mean filtering. For the basic layer, histogram equalization is used to stretch contrast, and the nonlinear function is used to enhance details for the detail layer. Finally, the different levels of the enhancement results are fused to obtain the infrared image with the contrast and detail enhanced. The simulated experiments on infrared images of different scenes are carried out through the proposed method. And the results are compared with those of different enhancement algorithms on the subjective and objective sides. The comparisons demonstrate that proposed method has better results in detail and contrast enhancement of infrared image.

Key words: Infrared image; Image enhancement; Retinex theory; Probability nonlocal means; Anisotropic diffusion; Contrast ratio

OCIS Codes: 100.2000; 100.2960; 100.2980; 100.3008; 130.3060

基金项目: 教育部联合基金项目 (Nos. 6141A02022631, 6141A02022366), 空军工程大学基础部基金 (No. JK201910)

第一作者: 李佳 (1977—), 女, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为光电成像与图像处理. Email: lijia_xidian@163.com

收稿日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-02-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

红外技术的快速发展使得红外像机在自动驾驶、夜间搜救、安防等领域的应用越来越广泛^[1].但红外像机所接收的热辐射信号在大气传输过程中容易被吸收、散射或被云层和水汽反射,使得所获取的红外图像对比度较低且缺乏细节纹理信息.这样低质量的红外图像难以满足实际应用需求,因此,对红外图像的对比度及细节的增强成为红外成像系统中的一项关键技术.

为提升原始红外图像的可视效果,图像增强算法必须在保留原始红外图像大部分信息的前提下,突出图像中的细节,拉伸图像对比度.现有图像增强算法按照操作域主要分为基于空域的图像增强算法和基于变换域的图像增强算法^[2].基于直方图的图像增强算法是一类非常重要的空域图像增强算法,直方图均衡^[3](Histogram Equalization, HE)将分布不均匀的直方图经过映射变换为均匀分布,使图像的对比度得到显著增强.然而,这种算法是对具有有限灰度分布的低质量红外图像的全局操作,容易产生细节损失及过度增强的现象.随后研究者们提出了各种针对 HE 的改进算法,包括平台直方图均衡^[4](Plateau Histogram Equalization, PHE)、对比度受限自适应直方图均衡^[5](Contrast Limited Adaptive histogram Equalization, CLAHE)和自适应平台直方图均衡^[6](Adaptive Plateau Histogram Equalization, APHE)等算法.这些改进的 HE 增强算法通过将直方图分段或设置阈值来改善图像细节丢失及过度增强的问题,得到了较好的效果.然而,基于直方图的增强算法只关注全局或局部灰度分布,没有考虑输入图像的结构特征,往往造成图像视觉效果生硬,以及噪声被增强的现象.另一类基于空域的图像增强算法是自适应图像增强,包括改进的反锐化掩膜方法^[7]、Retinex^[8]、同态滤波^[9](Homomorphic Filtering, HF)和数学形态学^[10]等方法.其中,反锐化掩膜方法利用低通滤波器分解图像,对分解后图像的各部分分别采用不同方法进行细节与对比度增强处理,得到了较好的增强效果.但滤波器对图像分解的结果在很大程度上决定了增强的结果.Retinex 图像增强算法能够较好地调节图像中的灰度分布,但在图像细节的增强方面不是很理想.基于变换域的图像增强^[11-12]方法主要包括傅立叶变换、小波变换、轮廓波变换等多尺度几何分析方法.这类增强方法首先将原始红外图像映射到变换域,再对分解后的子带系数进行分类,放大有用分量、缩小无用分量,最后反变换到空间域来实现图像增强.通过该类方法能实现对图像中明显的结构进行增强,但却忽略了弱的细节信息.

概率非局部均值滤波(Probabilistic Non-Local Means,PNLM)是对非局部滤波权重准确性改进的基础上提出的一种图像平滑滤波器,具有良好的保边去噪性能.将其应用于反锐化模板图像增强框架中,能够更精准地分解图像.鉴于此,本文针对红外图像对比度与细节增强的问题,提出了一种基于 Retinex 理论与概率非局部均值的红外图像增强方法.该方法充分利用了 Retinex 理论对图像灰度分布的调节作用以及概率非局部均值滤波在图像细节提取方面的良好性能,在图像的对比度及细节增强方面得到了较好的效果.

1 相关理论

1.1 Retinex 理论

Retinex 由视网膜(Retina)和大脑皮层(Cortex)两个词组构成,Retinex 理论^[13]作为一种人类视觉的亮度和颜色感知模型,揭示了物体的颜色变化不受光照环境变化的影响,而是由物体表面的反射引起,具有一致性.根据该理论,观测图像 $F(x, y)$ 可以被分解为两种不同的图像,即反射图像 $R(x, y)$ 和照度图像 $L(x, y)$,其中 $L(x, y)$ 可以看作光照的不均匀,是影响图像质量的主要因素,而 $R(x, y)$ 则被认为是不受外界影响的原始图像.其数学模型表示为

$$F(x, y) = R(x, y) \times L(x, y) \quad (1)$$

从 Retinex 理论的数学模型中,可以将照度图像 $L(x, y)$ 看作是附加在理想图像 $R(x, y)$ 上的乘性噪声,而图像增强的目的就是观测图像 $F(x, y)$ 中去除 $L(x, y)$ 的影响,还原场景本质信息,即 $R(x, y)$,达到增强图像的目的.单尺度 Retinex(Single-Scale Retinex, SSR)图像增强算法将式(1)转化到对数域计算入射图像 $R(x, y)$.SSR 可表示为

$$\log R(x, y) = \log F(x, y) - \log L(x, y) = \log F(x, y) - \log [G(x, y) * F(x, y)] \quad (2)$$

式中, $*$ 为卷积算子, $G(x, y)$ 是标准的环绕函数,且 $\iint G(x, y) dx dy = 1$.利用观测图像 $F(x, y)$ 来估计

$L(x, y)$, 通过处理 $F(x, y)$ 中像素与其环绕加权均值之间的比值来得到对光照的估计. SSR 中使用的高斯函数表示为

$$G(x, y) = \omega \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, σ 表示环绕邻域的标准差, 控制着图像中有多少细节信息被保留, 从而直接影响着图像增强的效果. ω 为归一化因子. 最终, $R(x, y)$ 可以由式(4)得到. SSR 的运算流程如图 1 所示.

$$R(x, y) = \exp\{\log F(x, y) - \log [G(x, y) * F(x, y)]\} \quad (4)$$

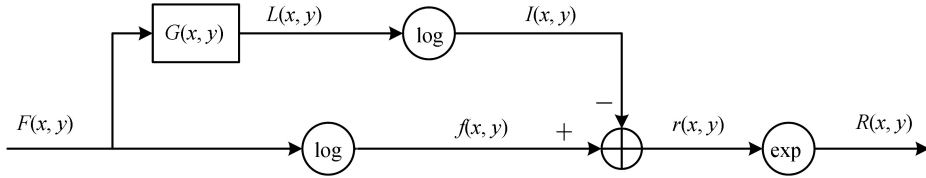


图 1 SSR 运算流程
Fig.1 SSR operation flow chart

1.2 概率非局部均值滤波

概率非局部均值^[14]方法是塔斯夫大学 WU Yue 等在对传统非局部均值^[15] (Non-Local Means, NLM) 改进的基础上提出的. PNLM 方法构造了一种新的概率权重, 使之能够更真实地反映两个图像块之间的相似性, 从而提高了权重的准确性.

NLM 利用图像中存在的局部自相似性来计算邻域像素的权重, 可表示为

$$y_i = \sum_{j \in P_i} \omega_{i,j} v_j / W_i \quad (5)$$

式中, i 和 j 表示图像中的像素点, v_j 为像素点 j 的像素值; $\omega_{i,j}$ 为像素点 j 的权重, 其大小取决于以像素 i 为中心的图像块 P_i 与以像素 j 为中心的图像块 P_j 之间的相似度, 且满足 $0 \leq \omega_{i,j} \leq 1$, $\sum_j \omega_{i,j} = 1$, 权重越大, 说明两个图像块越相似; W_i 为归一化参数, 表示为 $W_i = \sum_{j \in P_i} \omega_{i,j}$.

传统 NLM 使用指数函数来计算权重, 由于指数函数的缺陷, 权重计算会出现不准确的现象. 针对这一问题, PNLM 舍弃高斯权函数, 提出了一种新的概率权函数, 即

$$\omega_{i,j} = f_{i,j}(\tilde{R}_{i,j} / \tau^2) \quad (6)$$

式中, $f_{i,j}$ 为随机变量 $R_{i,j}$ 的概率密度函数, 将两个像素距离记为 $r_{i,j} = (v_i - v_j)^2 / 2\sigma^2$, 定义 $R_{i,j} = \sum_{k \in P} r_{i+k, j+k}$, $\tilde{R}_{i,j}$ 为估计方差 $2\hat{\sigma}^2$ 的估计距离; τ 是调优参数, 可以通过调节 τ 的大小来控制概率非局部均值对图像平滑的程度, τ 约大, 图像越平滑, 但图像中的边缘细节会变得模糊, 反之亦然.

当两个图像区域有重叠的部分时, $\tilde{R}_{i,j}$ 不服从独立同分布, 可认为其分布近似为

$$R_{i,j} \sim \xi_{i,j} \chi_{\eta_{i,j}}^2 \quad (7)$$

式中, $\xi_{i,j}$ 和 $\eta_{i,j}$ 分别为

$$\xi_{i,j} = \text{var}(R_{i,j}) / 2E(R_{i,j}) \quad (8)$$

$$\eta_{i,j} = E(R_{i,j}) / \xi_{i,j} \quad (9)$$

式中, $E(\cdot)$ 与 $\text{var}(\cdot)$ 分别表示均值和方差. 当 $\xi_{i,j}$ 和 $\eta_{i,j}$ 完全确定时, 即可得到 $R_{i,j}$ 的实际概率密度函数的最优近似, 表示为

$$f_{i,j}(R_{i,j}) = \chi_{\eta_{i,j}}^2(R_{i,j} / \xi_{i,j}) = \frac{(R_{i,j} / \xi_{i,j})^{\eta_{i,j}/2-1} \exp(-R_{i,j} / 2\xi_{i,j})}{2^{\eta_{i,j}/2} \Gamma[\eta_{i,j}/2]} \quad (10)$$

$\text{var}(R_{i,j})$ 和 $E(R_{i,j})$ 的不同会引起概率密度函数 $f_{i,j}$ 的不同.

根据以上分析, 概率密度函数通过构造相似块的欧式距离建立, 最后由概率分布函数确定权重的大小. 正是由于 NLM 权重的计算没有考虑空间的不相关性, 造成权重值的不准确. 而 PNLM 可以通过概率分布函数更好地反映图像块之间的相似性, 达到更优的平滑滤波结果.

2 基于 SSR 与 PNLN 滤波的红外图像增强

通过研究分析单尺度 Retinex 方法和概率非局部均值滤波方法,提出了一种联合 SSR 与 PNLN 的红外图像细节与对比度增强方法.针对红外图像低对比度和视觉效果不理想等不足,该方法利用 SSR 算法与 PNLN 滤波将原始红外图像进行不同层次的分解和处理,提高了红外图像的层次性,改善了红外图像的视觉效果.算法的具体操作流程如图 2 所示.本算法主要分为三部分:基于 SSR 的图像灰度调节、图像细节与对比度增强以及结果融合.

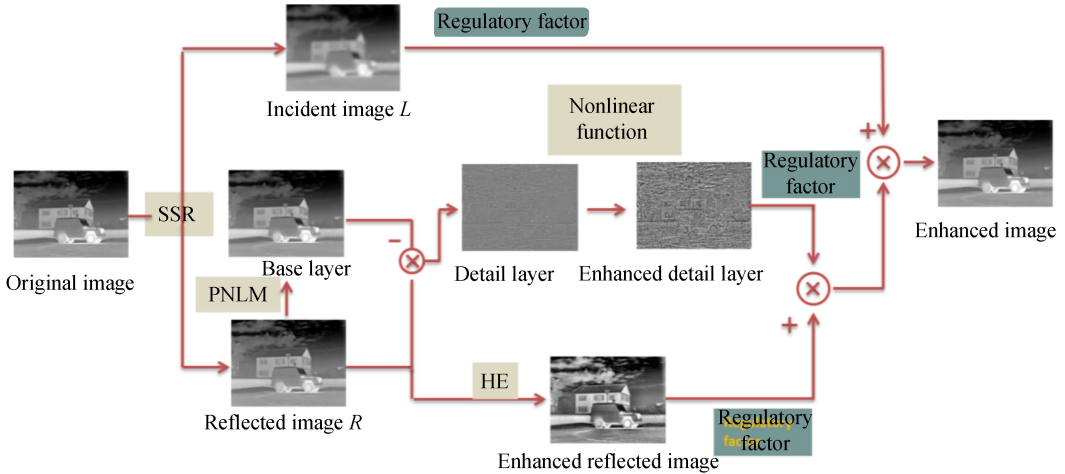


图 2 本文方法流程

Fig.2 Flow chart of proposed method

2.1 基于 SSR 的红外图像灰度调节

红外成像属于温差成像,通常场景中的背景与目标温差较小,因此,红外图像灰度分布区域往往较窄,图像对比度低,甚至有一些场景淹没在暗背景中.在 Retinex 理论中,图像的退化由光照不均匀引起,将该理论用于红外图像,可以将影响图像质量的因素看作叠加在理想图像之上的照度图像 $L(x, y)$.因此利用 SSR 算法就可去除这些因素,从而调节图像中过暗及过亮部分的灰度分布,凸显黑暗部分的场景细节,压缩过亮部分的灰度,使图像符合人眼感官要求.

设输入图像为 $A(x, y)$, $SSR(\cdot)$ 为单尺度 Retinex 算子,则经 SSR 处理得到的红外图像可以表示为

$$E_{SSR}(x, y) = SSR[A(x, y)] \quad (11)$$

式中, (x, y) 代表图像中像素点的坐标.由于 Retinex 理论假设光照变化是平缓的,SSR 算法中通常采用高斯滤波来估计光照图像,这样在图像中的强边界处对光照的估计就会产生偏差,进而场景边缘处产生光晕现象,因此,采用各向异性扩散方程^[16]来估计光照图像.各向异性扩散方程在对图像平滑的过程中,对于图像中的边界部分和平稳区域能够自适应地调节平滑尺度,因此较好地保持了图像的边界.利用各向异性扩散方程估计光照图像,能够更准确地估计图像中边界处的光照,避免在图像中的边缘处出现光晕现象.各向异性扩散方程定义为

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \text{div}[c(x, y, t)\nabla A] = \nabla c \cdot \nabla A + c(x, y, t)\Delta A \quad (12)$$

式中, $\text{div}(\cdot)$ 代表散度算子, ∇ 与 Δ 分别表示梯度算子和拉普拉斯算子, t 表示扩散时间, $c(\cdot)$ 代表扩散函数,它控制着扩散的程度.选择的非线性扩散系数为

$$c(x, y) = g(\|\nabla A(x, y)\|) \quad (13)$$

式中, $\|\nabla I\|$ 为梯度的大小, $g(\|\nabla I\|)$ 是一个边界停止函数,满足 $g(0) = 1, g(\infty) = 0$ 的条件.选择

$$g(\|\nabla A\|) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla A\|}{k}\right)^2} \quad (14)$$

式中, k 为调节参数,可以调节扩散系数的大小,从而控制各向异性扩散方程对于图像的平滑程度, k 值越

大,得到的图像更平滑,但同时,图像中的细节也更加模糊。

图 3 给出了本文 SSR 算法对一幅红外图像的处理结果,从图中可以看出,利用各向异性扩散方程所得到的光照图像考虑了图像边缘光照的突变性,避免了光晕现象的产生.从图 3(c)中看到,增强后的图像中,原图像较暗部分的场景细节被凸显出来,如右上角的云层.原图像中过亮部分的灰度级有所降低,使人眼的视觉效果更好.但整幅图像的灰度分布与原图像相比差异不大,为了进一步增强图像的对比度,扩大图像灰度级的分布范围,需要对图像 $E_{SSR}(x, y)$ 进行进一步处理。

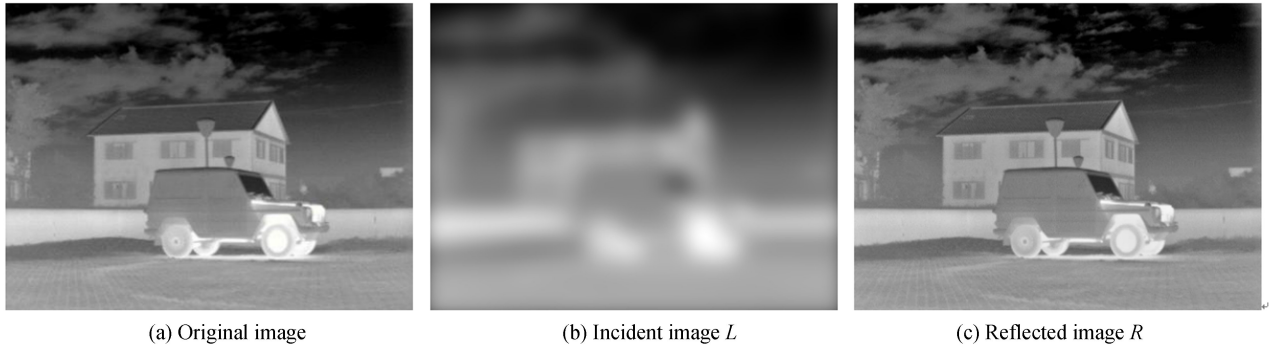


图 3 SSR 算法对图像的分解结果
Fig.3 SSR decomposition results

2.2 红外图像细节与对比度增强

为了进一步对图像的对比度及细节进行增强,采用 PNLM 滤波对 $E_{SSR}(x, y)$ 进行处理,将图像分解为基本层与细节层,对于基本层,利用直方图均衡化来增强图像对比度,对细节层进一步利用非线性函数增强图像中的细节同时抑制噪声。

通过 PNLM 获得包含低频信息的基本层可以表示为

$$D(x, y) = \text{PNLM}[E_{SSR}(x, y)] \quad (15)$$

式中, $\text{PNLM}[\cdot]$ 表示式(5)~(10)的计算过程,为对 $E_{SSR}(x, y)$ 进行滤波的过程.由于 PNLM 滤波具有良好的边缘保持性,因此基本层 $D(x, y)$ 中边缘信息损失较小,然后,可通过 2.1 节中得到的反射图像 $E_{SSR}(x, y)$ 减去基本层 $D(x, y)$ 得到包含边缘、纹理等高频信息的轮廓细节层 $N(x, y)$, 即

$$N(x, y) = E_{SSR}(x, y) - D(x, y) \quad (16)$$

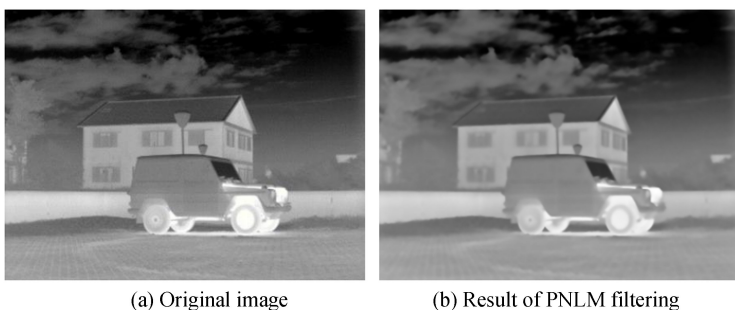
此时,所提取到的细节层主要是图像中的高频信息,这些信息中除了图像细节纹理、边缘信息外,还含有一部分噪声.为了在细节层中将噪声信息进行抑制,同时更加凸显其中的细节纹理与边缘,选用非线性函数对细节层进行处理.进一步增强图像纹理边缘,抑制噪声.非线性函数为

$$N_E(x, y) = \arctan[N(x, y)] \quad (17)$$

图 4 给出了利用 PNLM 来分解图像、获取细节信息并增强细节的情况.图 4 (b) 为基本层,通过 PNLM 滤波的处理,图像中的噪声被滤除,纹理细节同时也被一定程度滤除,但由于 PNLM 滤波较好的边缘保持性能,滤波后的图像中并未出现严重模糊现象.图 4(b) 的对比度与原图像相比差异不大,因此需要进一步进行对比度增强.采用直方图均衡化算法对 $D(x, y)$ 进行处理,得到对比度增强后的基本层 $D'(x, y)$ 为

$$D'(x, y) = \text{HE}[D(x, y)] \quad (18)$$

式中, $\text{HE}[\cdot]$ 为直方图均衡化算子。



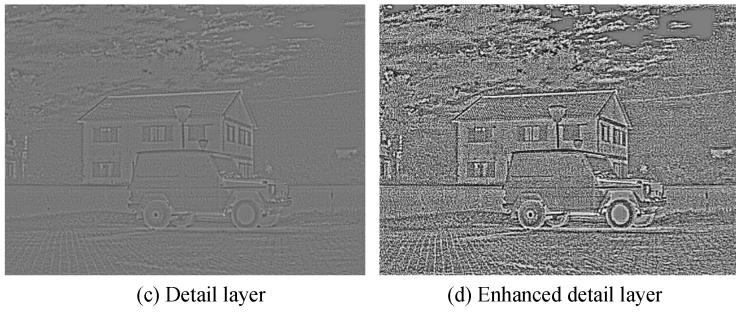


图4 基于PNLM的图像细节层增强

Fig.4 Enhancement of image detail layer based on PNLM

图4(c)、(d)分别为通过式(16)所得到的细节层以及通过式(17)得到的增强的细节层,由图中可以看出,通过非线性函数增强处理,细节纹理更加突出。

2.3 图像融合

通过2.1与2.2节的方法分别得到对比度增强后的图像 $D'(x,y)$ 与增强后的细节图像 $N_E(x,y)$,将其合并得到

$$\hat{R}(x,y) = \alpha_1 D'(x,y) + \alpha_2 N_E(x,y) \quad (19)$$

式中, α_1 与 α_2 为调节参数,用来调节增强后图像中细节层与基本层的强度,通常 α_1 选择1, α_2 选择2~5.由于照度图像 $L(x,y)$ 代表了大气对红外辐射的综合作用分量,因此,对其不做任何处理.最后,将图像 $\hat{R}(x,y)$ 与原始照度图像 $L(x,y)$ 进行合并,获得最终高对比度且轮廓细节突出的高质量红外增强图像 $\hat{F}(x,y)$,合并规则为

$$\hat{F}(x,y) = \exp[\log(\hat{R}(x,y) + \alpha L(x,y))] \quad (20)$$

式中, α 为调节参数,用于调节照度图像对增强图像的影响程度,在本文算法中,取 $\alpha=0.2$,能够使增强后的图像与原红外图像的热辐射分布一致,避免过度增强。

3 实验结果

为了客观评价本文算法的性能,采用四组红外图像对几种图像增强算法进行了测试.这四组红外图像分别为:1)校场训练人物图;2)包含道路、人物和树木的场景图;3)房屋与汽车图;4)大桥图.前两幅和第四幅红外图像的大小均为 256×256 ,第三幅图像的大小为 240×320 .采用主观与客观两种方式对红外图像增强方法进行评价.实验的软件运行环境为MATLAB R2012b和Windows 10,硬件环境为Inter(R) Core(TM) i3-3220 CPU @3.3GHz和2GB内存的笔记本电脑.选择直方图均衡化(HE)、同态滤波(HF)、单尺度Retinex(SSR)和限制对比度的直方图均衡化(CLAHE)图像增强方法与本文图像增强方法进行比较。

3.1 主观评价

图5到图8分别为四幅图像的增强结果.图5为射击人物图的增强结果.从图5(a)可以看出,原图像中包含人物、远处的树木及房屋,图像的整体灰度级较低,远处的房屋树木模糊不清.从图5(b)~(f)可以看出,通过HE方法增强的图像整体灰度级有很大提升,地面部分的对比度明显提高,但该方法处理后的图像出现了过度增强的现象.射击的人物经过HE算法处理后只剩下高亮的轮廓,而衣服纹理、头发等细节部分全部消失.这种现象是由于HE的方法对于出现概率较低的细节部分的灰度级有抑制作用,所以,在整幅图像对比度增强的情况下图像中的纹理细节反而被抑制.HF滤波增强效果较为柔和,图像亮度虽得到整体提升,但整幅图像对比度和轮廓细节并没有获得明显改善;SSR算法对图像的细节增强有一定的效果,特别对于暗处的树木房屋等背景有一定的增强效果,但整体亮度改善不明显.CLAHE方法是对HE方法的改进,从增强效果也可看出该方法较好地克服了HE方法过度增强、图像中细节被抑制的缺陷,在图像的对比度及细节增强方面都有良好的表现.本文所提方法增强后图像背景中树木、房屋以及人物衣服上的纹理细节都更加丰富,同时图像的对比度也得到了很大的改善,视觉效果更好。



图 5 不同方法对红外图像的增强结果(校场训练人物)

Fig.5 Enhancement results of different methods for infrared image (training figure)



图 6 不同方法对红外图像的增强结果(车与树木)

Fig.6 Enhancement results of different methods for infrared image (car and trees)

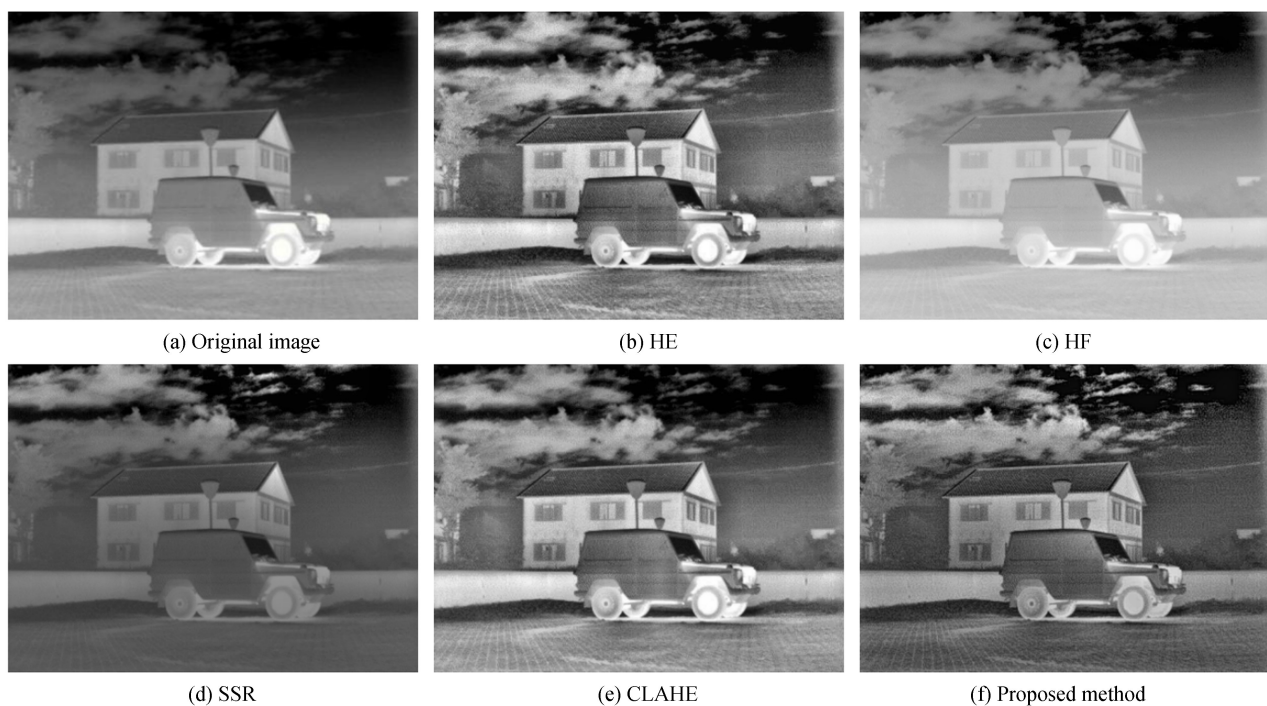


图 7 不同方法对红外图像的增强结果(汽车与房屋)

Fig.7 Enhancement results of different methods for infrared image (jeep and house)

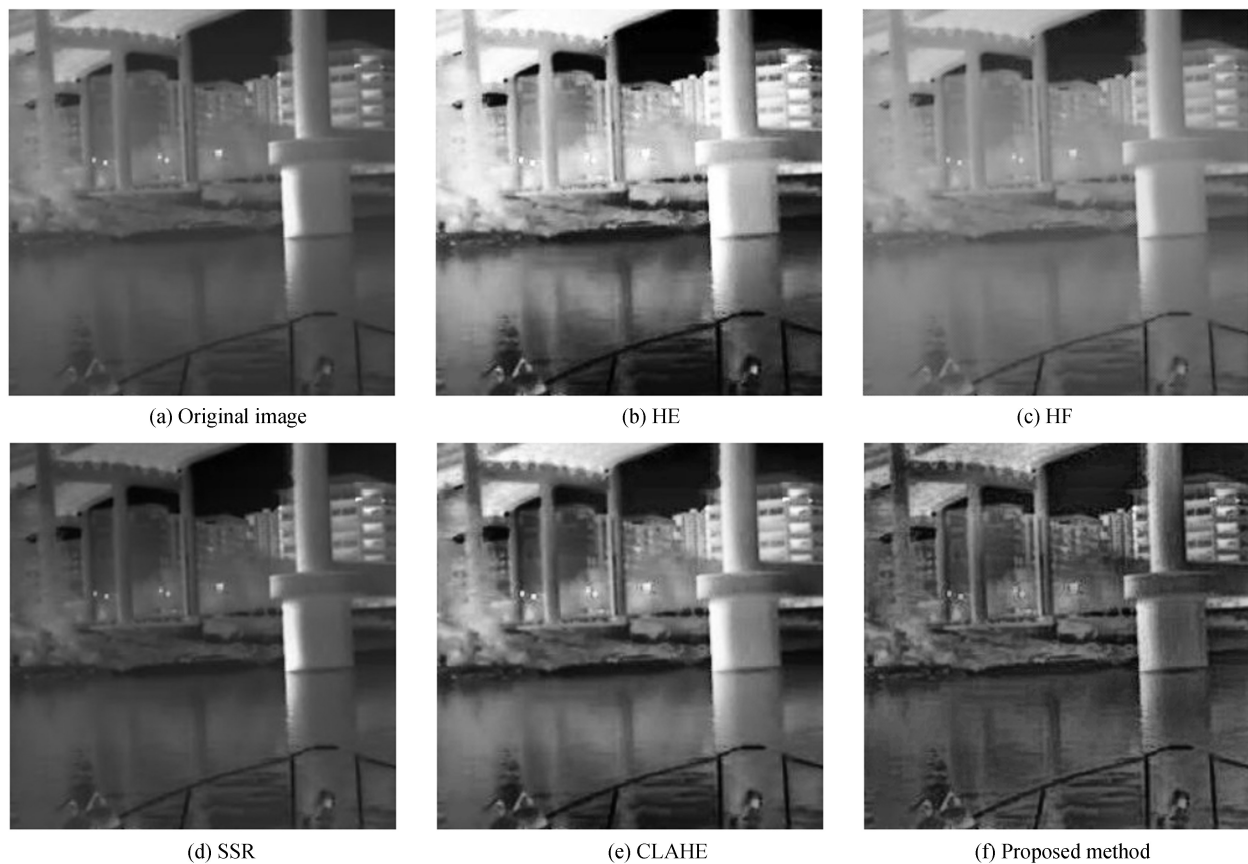


图 8 不同方法对红外图像的增强结果(大桥)

Fig.8 Enhancement results of different methods for infrared image (bridge)

图 6 中的场景包括汽车与树木.原始红外图像整体偏暗,树木与汽车灰度较低,无法辨别细节.通过几种增强算法处理后可以看出,HE 算法同样出现了过度增强的现象,尤其在汽车前轮处出现过亮的情况,视觉

效果不好.HF 与 SSR 算法也取得了一定的增强效果,但对细节的增强效果并不明显.本文算法与 CLAHE 增强算法效果最好,通过对比明显看出,本文算法在对图像细节的增强方面更胜一筹.图 7 与图 8 的增强结果与前两幅图像的结果较为一致,从这四幅红外图像的仿真实验结果可以看出,本文算法在人物、天空云层、房屋树木等场景的细节与对比度增强方面都表现出了良好的性能.

3.2 客观评价

为了客观比较不同增强方法对红外图像增强效果的性能,采用熵增强(Enhancement by Entropy, EME)与平均梯度(Average Gradient, AVG)这两个评价指标来衡量图像的增强效果.

EME 是增强中常用的评价指标,它利用分块方法得到图像的近似对比度,值越大代表图像具有更符合韦伯定律的视觉效果.其定义为

$$EME = \frac{1}{K_1 K_2} \sum_{i=0}^{K_1} \sum_{j=0}^{K_2} 20 \lg(I_{\max}^{(x,y)} / I_{\min}^{(x,y)}) \quad (21)$$

在使用 EME 来度量图像质量时需将图像分块,将图像分为 $K_1 \times K_2$ 块,求得每个图像块的灰度最大值 $I_{\max}^{(x,y)}$ 和最小值 $I_{\min}^{(x,y)}$,最后取对数求和并对块取平均即可得到度量数值.

AVG 反映了图像中的微小细节反差与纹理变化特征,同时也反映了图像的清晰度,该值越大,说明图像越清晰.计算方法为

$$AVG = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \frac{\sqrt{(\nabla I_h^2(x,y) + \nabla I_v^2(x,y))}}{M \times N} \quad (22)$$

式中, ∇I_h 与 ∇I_v 分别表示图像中某一像素水平与垂直方向的梯度. M 、 N 表示图像中行与列的个数.

表 1 与表 2 分别为 EME 和 AVG 的结果,从表格中可以看出,本文方法的 EME 和 AVG 两项指标都取得了更好的结果,因此通过本文方法处理后的图像对比度和视觉效果更好,图像质量更佳.

表 1 不同方法增强结果的 EME

Table 1 EME of results enhanced by different methods

Image	Original image	HE	HF	SSR	CLAHE	Proposed method
Training figure	14.255 8	19.948 3	8.404 8	14.659 4	21.839 7	29.191 6
Car and trees	23.530 4	30.174 3	13.578 7	28.106 5	34.893 3	42.435 3
Jeep and house	12.13	26.174 8	7.780 7	13.082 9	20.415 5	27.564 9
Bridge	11.228 0	25.214 3	11.871 1	17.097 2	26.835 4	30.221 0

表 2 不同方法增强结果的 AVG

Table 2 AVG of results enhanced by different methods

Image	Original image	HE	HF	SSR	CLAHE	Proposed method
Training figure	2.683 8	6.575 9	2.899 7	2.884 8	5.316 3	7.233 1
Car and trees	2.882 0	10.094 1	5.085 3	4.809 7	7.221 6	10.223 6
Jeep and house	3.384 3	9.481 4	3.909 4	4.136 6	7.739 7	10.154 4
Bridge	3.140 4	6.343 0	3.468 1	3.355 8	6.317 1	7.116 0

4 结论

本文提出了一种基于概率非局部均值与 Retinex 理论的红外图像细节增强方法,通过单尺度 Retinex 算法和概率非局部均值对原始红外图像进行不同层次的分解处理,针对不同的层次采用不同的增强处理方法来增强图像的对比度与细节,最后将不同层次的增强结果相融合得到最终的增强结果.与多种方法在主、客观方面进行实验对比分析,结果表明所提方法处理的图像具有更丰富的内容、更明显的细节和纹理,以及更符合人眼的视觉效果.但本文算法计算复杂度较高,在算法的实时性方面有待进一步提高.在后续工作中应针对实时性进行改进,以适应实际应用的需求.

参考文献

[1] SHI Yong-biao,ZHANG Yong. Survey on development about vehicular infrared night vision technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 504-510.
石永彪,张湧. 车载红外夜视技术发展研究综述[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 504-510.

- [2] LI Geng-fei. Research on adaptive image real-time enhancement algorithm[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
李庚飞. 自适应图像实时增强算法的技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [3] DING Chang, DONG Li-li, XU Wen-hai. Review of “histogram” equalization technique for image enhancement[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, **53**(23):12-17.
丁畅, 董丽丽, 许文海. “直方图”均衡化图像增强技术研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2017, **53**(23): 12-17.
- [4] WU Wei, YANG Xiao-min, LI Hong, *et al.* A novel scheme for infrared image enhancement by using weighted least squares filter and fuzzy plateau histogram equalization[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, **76**(54): 1-29.
- [5] SINGH P, MUKUNDAN R, DE R. Feature enhancement in medical ultrasound videos using contrast-limited adaptive histogram equalization[J/OL]. *Journal of Digital Imaging* [2020-01-14]. <https://doi.org/10.1007/s10278-019-00211-5>
- [6] ZHANG Yun-feng. Adaptive plateau histogram equalization for infrared image based on scene complexity computation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, **31**(7): 695-702.
张云峰. 基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡[J]. 液晶与显示, 2016, **31**(7): 695-702.
- [7] ZUO Chao, CHEN Qian, LIU Ning, *et al.* Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(12): 127401.
- [8] TIAN Hui-juan, CAI Min-peng, GUAN Tao, *et al.* Low-light image enhancement method using retinex method based on YCbCr color space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0210002.
田会娟, 蔡敏鹏, 关涛等. 基于 YCbCr 颜色空间的 Retinex 低照度图像增强方法研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(2): 0210002.
- [9] LI Ying-chun, DU Lin, LIU Shuai. Image enhancement by lift-wavelet based homomorphic filtering[C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Electronics, Communications and Control, IEEE Computer Society, 2012: 1623-1627.
- [10] XIANG Jing-bo, SU Xiu-qin, LU Tao. Image enhancement based on the contourlet transform and mathematical morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 224-227.
向静波, 苏秀琴, 陆陶. 基于 Contourlet 变换和形态学的图像增强方法[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 224-227.
- [11] LI Liang-liang, SI Yu-juan, JIA Zhen-hong. Medical image enhancement based on CLAHE and unsharp masking in NSCT domain[J]. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2018, **8**(3): 431-438.
- [12] TIAN Zi-jian, WANG Man-li, WU Jun, *et al.* Mine image enhancement algorithm based on dual domain decomposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(5): 0510001.
田子建, 王满利, 吴君, 桂伟峰等. 基于双域分解的矿井下图像增强算法[J]. 光子学报, 2019, **48**(5): 0510001.
- [13] ANIL S P, KAVINDER S. A study on Retinex based method for image enhancement[C]. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2018: 619-624.
- [14] WU Yue, TRACEY B, NATARAJAN P, *et al.* Probabilistic non-local means[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, **20**(8): 763-766.
- [15] BUADES A, COLL B, MOREL J. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, **4**(2): 490-530.
- [16] YUAN Jian-jun, LIU Li-pei. Anisotropic diffusion model based on a new diffusion coefficient and fractional order differential for image denoising[J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2016, **16**(1): 1650003.