

文章编号: 0253-2239(2010)10-2788-06

# 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法

占必超<sup>1</sup> 吴一全<sup>1,2</sup> 纪守新<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)  
(<sup>2</sup>南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要** 针对基于小波变换的红外图像增强方法视觉效果不够理想的缺点,提出了一种基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法,利用 Retinex 增强算法增强图像的视觉效果,并改善其亮度均匀性。首先,对红外图像经平稳小波变换后的最大尺度低频子带图像进行多尺度 Retinex 增强;然后,利用贝叶斯萎缩阈值法对高频子带图像进行阈值去噪,并根据低频子带图像的局部对比度和模糊规则计算高频子带的增益系数,从而得到增强后的高频子带图像;最后,由低频子带图像和高频子带图像重构得到增强后的图像。针对大量图像进行了实验和增强效果的定性定量评价,并与双向直方图均衡法、二代小波变换法、Curvelet 变换法和多尺度 Retinex 法作了比较。结果表明,所提出的方法增强了图像细节,抑制了噪声,并明显改善了图像的整体视觉效果。

**关键词** 红外图像处理;图像增强;平稳小波变换;多尺度 Retinex 法;模糊规则

**中图分类号** TN219 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2788

## Infrared Image Enhancement Method Based on Stationary Wavelet Transformation and Retinex

Zhan Bichao<sup>1</sup> Wu Yiquan<sup>1,2</sup> Ji Shouxin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)  
(<sup>2</sup> State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract** As infrared image enhancement method based on wavelet transformation has the problem of unperfect visual effect, and Retinex enhancement algorithm can enhance visual effect of the image by improving brightness uniformity, a method based on stationary wavelet transformation and Retinex is proposed. Firstly, the infrared image is decomposed into high-frequency detail and low-frequency approximation components at various resolutions, and the low frequency subband image of the largest scale is enhanced by multiscale Retinex algorithm. Then, the high-frequency subband images are denoised by Bayesian shrinkage method, and the gain coefficients of high-frequency subbands are available by calculating the local contrast of the enhanced low-frequency subband based on fuzzy rules to get the enhanced high-frequency subband images. Finally, the enhanced image is reconstructed by the low-frequency subband and high-frequency subbands. Experiments with qualitative and quantitative evaluation are carried out for many images, and the proposed method is compared with histogram double equalization method, second generation wavelet transform method, curvelet transform method, and multiscale Retinex method. Experimental results show that the proposed method can enhance image details and suppress noise better, and the whole visual effect is improved significantly.

**Key words** infrared image processing; image enhancement; stationary wavelet transformation; multiscale Retinex method; fuzzy rules

收稿日期: 2010-06-11; 收到修改稿日期: 2010-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(60872065)和南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放基金(KFKT2010B17)资助课题。

作者简介: 占必超(1986—),男,硕士研究生,主要从事红外图像处理与目标跟踪等方面的研究。

E-mail: zhbch1986@126.com

导师简介: 吴一全(1963—),男,博士,教授,主要从事图像处理、目标检测与识别等方面的研究。

E-mail: nuaaimage@yahoo.com.cn

## 1 引言

红外成像技术已被广泛地应用于搜索预警、精确制导、光学遥感和夜间导航等军用或民用领域中,其良好的隐蔽性、较强的抗干扰能力以及可昼夜工作等特点使得红外成像系统在这些领域中起着至关重要的作用<sup>[1,2]</sup>。但由于红外探测器受到大气热辐射、探测器噪声以及作用距离远等因素的影响,红外图像对比度差、信噪比低、目标形状和结构的信息不足,这些势必增加了目标检测、跟踪和识别的难度。因此,在红外目标的检测、跟踪和识别之前,需要对红外图像进行预处理,增强对比度,提高信噪比,或者对图像进行某种特定的变化,从而增强图像细节,改善视觉效果,使图像更适合后续人和计算机的分析和处理。

直方图均衡化法<sup>[3]</sup>和反锐化掩模法<sup>[4]</sup>是比较常用的图像增强方法,但在增强图像对比度的同时也不可避免地放大了噪声。小波分析等多分辨率分析方法提供了解决这一问题的有效途径。基于小波变换理论的红外图像增强技术由于采用小波变换而带来了更高的计算效率且图像的梯度提供了比直方图更直接、更多的空间信息<sup>[5]</sup>。由于多分辨率分析方法具有良好的信号与噪声分离特性,许多学者将其应用于红外图像的增强。文献<sup>[6]</sup>提出了一种基于平稳小波变换和非线性增益的红外图像对比度增强方法,在有效增强红外图像对比度的同时,又能很好地抑制红外图像中的相关噪声、加性高斯白噪声和乘性噪声。由于二代小波变换不需要进行傅里叶变换,且比传统小波变换计算量小,文献<sup>[7]</sup>利用二代小波多尺度分解操作提取图像的多尺度特征,通过模糊非线性增强算子来改变图像特征的强度。因 Curvelet 变换和 Contourlet 变换擅长描述图像中的轮廓和方向性纹理信息,国内外学者相继将其应用于图像增强<sup>[8,9]</sup>。但是,Curvelet 变换对于高阶正则的奇异边缘不能达到最优的非线性逼近,增强后的图像边缘处存在划痕;小波变换与 Contourlet 变换都缺乏平移不变性,图像增强结果会产生 Gibbs 失真现象。此外,上述方法对于非均匀或亮度不足的红外图像,增强后的视觉效果不太理想。而 Retinex 增强算法能增强图像的视觉效果,改善其亮度均匀性,有效地显示淹没在阴影区域中的细节<sup>[10~12]</sup>。为此,本文提出了一种基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法。为了对本文方法的增强效果进行有效评价,在实验结果和分析中,从定性和定量两个方面与双向直方图均衡法、二代小波变换法、

Curvelet 变换法和多尺度 Retinex 法进行了比较。

## 2 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法

基于小波变换的增强算法是将图像分解为不同尺度的子带图像,通过改变子带的小波系数来增强图像。在小波域中,噪声主要存在于小尺度信号中,随着分析尺度的不断增大,噪声下降得很快,而对于边缘细节点,这种下降要慢<sup>[13]</sup>。因此,基于小波变换的增强算法能在增强对比度的同时抑制噪声。红外图像灰度间的相关性较大且噪声大多表现为相关噪声。由于平稳小波变换是一种冗余小波变换,因而更适合于处理相关性问题。另外,由于不存在信号的下采样过程,平稳小波变换可以有效地避免因小波基不具有平移不变性而造成重构信号产生 Gibbs 震荡的问题<sup>[14~16]</sup>。

在平稳小波变换域中,图像低频信息集中在绝对值较大的尺度系数中;高频信息集中在绝对值较小的细节系数中。红外图像的噪声大多表现为高频分量,所以在平稳小波变换域中,噪声主要集中在细节系数中。因此,根据图像的低频信息增强图像的高频细节部分,即通过图像的最大尺度低频系数计算细节系数的增益系数,对不同细节区域进行不同程度的增强,可以仅对图像细节增强,且避免在某些区域过增强或增强不足的现象。

### 2.1 低频子带图像的增强

红外图像反映了物体的热辐射分布,其清晰度低于可见光图像,分辨率较低。基于 Retinex 理论的增强算法通过原始图像与高斯函数的卷积获得最优亮度估计,从而改善图像的亮度均匀性。图像的能量信息主要在低频,通过 Retinex 算法可以很好地完成低频子带图像的动态压缩,改善图像的整体视觉效果。

Land 提出 Retinex 作为人眼感知亮度和色度的视觉模型,其实质是将一幅图像用环境亮度函数(亮度图像)和物体反射函数(反射图像)的乘积表示,然后通过改变亮度图像和反射图像在原图像中的比例来达到增强图像的目的。红外图像是目标热辐射和背景热辐射(环境红外辐射照度)综合作用的结果。环境亮度函数描述了背景热辐射强度,而物体反射函数则体现了物体的目标特征,将 Retinex 算法应用于红外图像的增强即可抛开物体的背景辐射强度仅反映目标自身特性的信息。Retinex 理论

论述了人眼视觉系统如何获取景物的图像,并具有色感一致性。所谓色感一致性,是指人眼能够在不同亮度情况下仍可辨认物体本来颜色的能力<sup>[17]</sup>。Retniox 算法在处理彩色图像时,它分别对每个颜色通道进行处理然后再合成。对于红外灰度图像而言,可以认为只有一个颜色通道,色感一致性体现了在不同亮度情况下分辨物体灰度级(亮度)的能力,因此,Retinex 算法也适用于对红外灰度图像进行处理。

单尺度 Retinex 算法公式为

$$R(x, y) = \ln I(x, y) - \ln [G(x, y) * I(x, y)], \quad (1)$$

式中  $I(x, y)$  表示输入图像; \* 表示卷积运算;  $R(x, y)$  表示经 Retinex 算法处理后的输出图像;  $G(x, y)$  为环境函数,通常采用高斯函数的形式,表示为

$$G(x, y) = \lambda \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\epsilon^2}\right], \quad (2)$$

式中  $\lambda$  可由  $\iint G(x, y) dx dy = 1$  确定。 $\epsilon$  为尺度常量,  $\epsilon$  较小时,算法的动态压缩能力强;  $\epsilon$  较大时,图像的色感一致性较好<sup>[18]</sup>。为了在动态范围压缩和色感一致性之间取得较好的平衡,采用多尺度 Retinex 算法。该算法可描述为

$$R(x, y) = \sum_{k=1}^K \omega_k \{ \ln I(x, y) - \ln [G_k(x, y) * I(x, y)] \}, \quad (3)$$

式中  $K$  为尺度数,  $\omega_k$  为对应于第  $k$  个尺度  $\epsilon_k$  的权值,且满足  $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ 。

低频子带图像的增强过程如下:

首先,进行平稳小波变换低频子带系数的线性映射。平稳小波变换后的低频子带系数有正有负,而多尺度 Retinex 增强算法处理的是灰度图像或彩色图像。因此,必须将低频子带系数  $f(i, j)$  映射到  $[0, 255]$  范围内,即采用以下线性映射

$$f'(i, j) = \frac{f(i, j) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \times 255, \quad (4)$$

式中  $f_{\max}, f_{\min}$  分别为低频子带系数的最大值和最小值,  $f'(i, j)$  为正规化结果。

其次,将  $f'(i, j)$  作为输入图像,按照(3)式进行多尺度 Retinex 增强。

再次,对上述结果进行截断拉升。鉴于多尺度 Retinex 增强后的输出图像  $R(i, j)$  较灰暗,且输出图像直方图近似服从正态分布,进行自动截断拉升:

$$R_{\text{out}}(i, j) = \begin{cases} 0, & R(i, j) < R_{\min} \\ \frac{R(i, j) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, & R_{\min} \leq R(i, j) \leq R_{\max} \\ 1 & R(i, j) > R_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $R_{\text{out}}(i, j)$  为截断拉升后的输出值。根据正态分布特性,利用图像的均值  $m_R$  和标准差  $S_d$  来确定截取点的下限  $R_{\min}$  和上限  $R_{\max}$ ,  $R_{\min} = m_R - d \times S_d$ ,  $R_{\max} = m_R + d \times S_d$ , 其中  $d$  的取值为  $1.5 \sim 3$ 。

最后,经多尺度 Retinex 增强算法处理后,为了能从低频子带图像重构结果图像,应采用线性变换将上述处理之后的低频子带系数映射到  $[f_{\min}, f_{\max}]$  范围内。

## 2.2 高频子带图像的增强

红外图像经平稳小波变换后,噪声主要位于高频子带中,且随着分解尺度的增大,噪声下降很快。为了尽可能地降低噪声影响,先对高频子带图像去噪,并由最大尺度低频子带图像的局部对比度确定高频子带的增益系数,然后对高频子带图像进行增强。

基于无噪图像小波系数服从广义高斯分布的先验模型,Chang 等<sup>[19]</sup>提出了贝叶斯萎缩(Bayesian shrinkage)阈值估计方法。Bayesian shrinkage 阈值  $T_{l,k}$  为

$$T_{l,k} = \hat{\sigma}_n^2(l) / \hat{\sigma}_{l,k}, \quad (6)$$

式中  $\hat{\sigma}_n^2(l)$  为不同尺度下的噪声方差估计,估计表达式为

$$\hat{\sigma}_n^2(l) = \hat{\sigma}_n^2(l=1) \exp(1 - l^{-1.2}). \quad (7)$$

由于噪声主要集中在最小尺度的对角细节子带  $HH_1$  中,所以可利用该子带的系数来估计噪声方差:

$$\hat{\sigma}_n^2(l=1) = \frac{\text{median}[|g_{1,3}(i, j)|]}{0.6745}, \quad (8)$$

$$g_{1,3}(i, j) \in HH_1.$$

式中  $\text{median}[\cdot]$  是求中值函数。

对于  $l$  层  $k$  方向的子带,根据最大似然估计,得到子带内信号的标准方差为

$$\hat{\sigma}_{l,k} = \sqrt{\max\left\{0, \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{l,k}^2(i, j) - \hat{\sigma}_n^2(l)\right\}}, \quad (9)$$

式中  $M$  和  $N$  分别为图像的长度和宽度,平稳小波变换后子带图像与原始图像大小相同。

硬阈值函数可以很好地保留图像边缘特征,但在阈值处缺乏连续性,重构图像在边缘处可能会出

现振铃等视觉失真。软阈值函数处理结果相对平滑得多,视觉效果也更好。因此本文采用软阈值去噪。

若用  $A(i, j)$  表示增强后低频子带图像的像素点,则可定义该子带图像的局部对比度为

$$C(i, j) = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (10)$$

式中  $A_{\max}$  和  $A_{\min}$  分别为以  $A(i, j)$  为中心的  $3 \times 3$  窗口内的灰度最大值和最小值。根据局部对比度定义可知,细节区域的局部对比度大;平坦区域的局部对比度小。可由像素点  $A(i, j)$  的局部对比度  $C(i, j)$  判断其属于各区域(低、中、高细节区域)的隶属度  $\mu_s$  ( $s = 1, 2, 3$  分别代表低、中、高细节区域)。 $\mu_s$  是一个模糊的从属关系,并不能准确判断该点位于哪个细节区域。各个区域的隶属度可表示为

$$\begin{aligned} \mu_s(i, j) &= 4 \operatorname{sigm}\{a_s [C(i, j) - b_s]\} \times \\ &\operatorname{sigm}\{-a_s [C(i, j) - b_s]\}, \\ s &= 1, 2, 3, \quad C(i, j) \in [0, 1] \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\operatorname{sigm}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$ 。参数可由实验确定,  $a_1 = a_3 = 10, a_2 = 15, b_1 = 0, b_3 = 1$ 。 $b_2$  可调节像素属于中细节区域的隶属度大小,即控制重点增强区域,  $b_2$  为最大尺度低频子带图像的局部对比度均值。

为了对高频子带图像  $g_{l,k}(i, j)$  ( $l = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, 3$ ) 进行有效增强,同时避免放大噪声损害图像质量,可根据最大尺度低频子带图像的局部特性计算高频子带图像  $g_{l,k}(i, j)$  的增益系数。高频子带增益系数的设计原则为:对低细节和高细节区域进行适度增强,重点增强中部细节区域<sup>[20]</sup>。设低、中、高细节区域的增强因子分别为  $\lambda_{\text{low}}, \lambda_{\text{mid}}, \lambda_{\text{high}}$ 。在最大尺度低频子带图像上计算局部对比度  $C(i, j)$ ,然后通过(11)式计算当前高频子带图像像素点属于低、中、高细节区域的隶属度  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ ,则该像素点的最终增益系数为

$$\lambda_{l,k}[\mu(i, j)] = \frac{\mu_1 \lambda_{\text{low}} + \mu_2 \lambda_{\text{mid}} + \mu_3 \lambda_{\text{high}}}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}, \quad (12)$$

式中  $1 \leq \lambda_{\text{high}} \leq \lambda_{\text{low}} < \lambda_{\text{mid}}$ 。在实验中发现,取  $\lambda_{\text{low}} = 1.5, \lambda_{\text{mid}} = 3, \lambda_{\text{high}} = 1$  时,对大部分图像都能取得较好的增强效果。 $\lambda_{\text{mid}}$  作为调节锐化强度的控制参数,可根据图像的细节特征丰富程度进行调节。

### 2.3 对比度增强算法步骤

基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强算法主要包含以下 4 个步骤:

1) 对原始图像进行  $L$  层离散平稳小波分解 ( $L=2$ ),得到表示低频信息的尺度系数和表示高频

信息的细节系数;

2) 对第  $L$  层的低频子带图像进行多尺度 Retinex 增强。实验中尺度分别取 15, 80, 250, 权重均为 1/3;

3) 利用(6)式计算各高频子带的阈值,并对高频子带图像进行软阈值去噪;

4) 计算多尺度 Retinex 算法处理后第  $L$  层低频子带图像的局部对比度  $C(i, j)$ ,并利用模糊规则确定高频子带图像的增益系数,得到增强后的高频子带图像;

5) 由增强后的低频子带图像和高频子带图像重构得到增强后的结果图像。

## 3 实验结果与分析

利用 2 节提出的基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法对大量图像进行实验,并与双向直方图均衡法、二代小波变换法、Curvelet 变换法和多尺度 Retinex 法进行了比较,发现本文方法的整体增强效果优于上述方法。现选取其中两幅有代表性的图像加以说明,分别为住宅红外图像和街道红外图像,两幅图像均具有背景偏暗且亮度不均匀的特点。图 1,图 2 分别为两幅图像采用不同的方法增强后的结果。从两幅图像增强结果的对比中可以看出:双向直方图均衡法在增强图像对比度的同时,显著放大了噪声,部分区域出现了过增强或增强不足的现象;二代小波变换法和 Curvelet 变换法较好地抑制了噪声,没有出现过增强的现象,而视觉效果不及多尺度 Retinex 法;多尺度 Retinex 法虽然能增强红外图像的视觉效果,改善其亮度均匀性,但不能消除红外图像大量的噪声,也没有突出红外图像的细节特征;本文方法采用多尺度 Retinex 算法对红外图像进行亮度调节,有效地显示淹没在阴影区域中的细节(如住宅图像的屋檐及房顶亮斑区域和街道图像中角落里的行人),利用平稳小波变换方法增强图像的细节并抑制噪声,较好地改善了图像的整体增强效果。

为了定量地评价图像增强的效果,选用图像的对比度(Contrast)和信噪比(SNR)对增强效果进行客观评价。图像对比度的测量函数定义为

$$C_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(m, n), \quad (13)$$

式中  $\varphi(m, n)$  为(10)式定义的局部对比度。图像对比度越高,图像的局部对比度改善程度越明显。信噪比在一定程度上反映了增强方法抑制噪声的能

力。信噪比越高,噪声抑制能力越强。

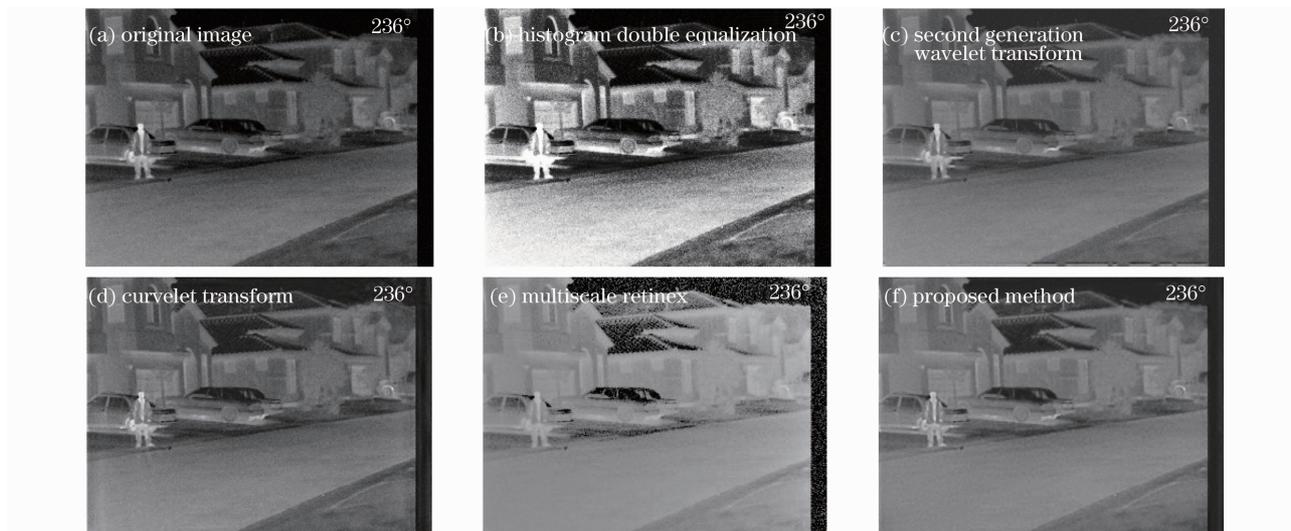


图 1 住宅红外图像的实验结果

Fig. 1 Experimental results of house infrared image

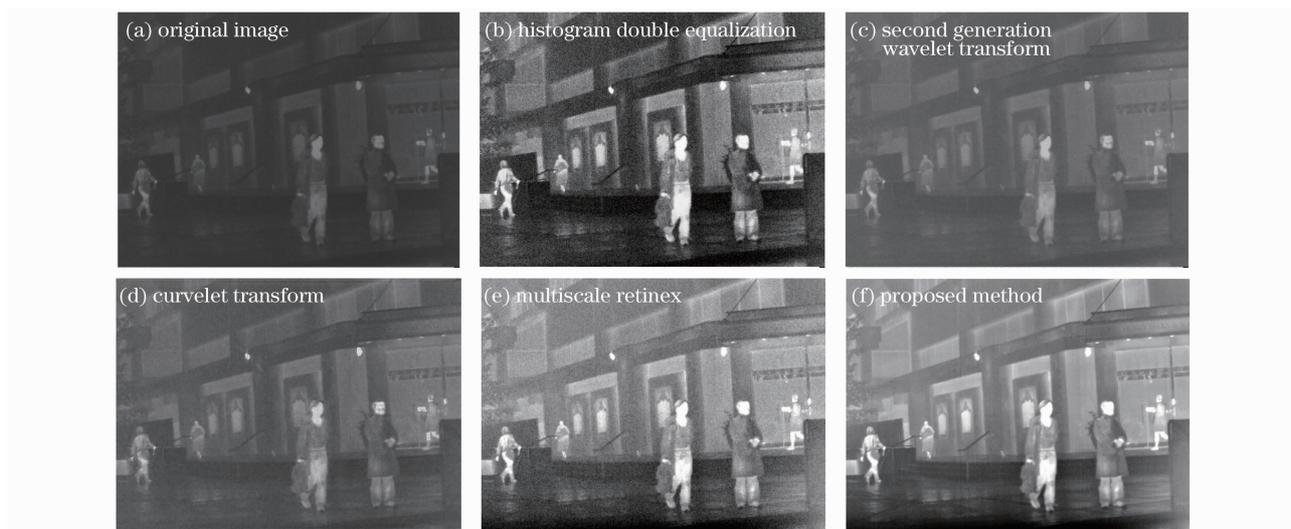


图 2 街道红外图像的实验结果

Fig. 2 Experimental results of street infrared image

表 1 给出了各种方法的定量评价指标,可见双向直方图均衡法和多尺度 Retinex 法在增强图像对比度的同时放大了噪声;二代小波变换法和 Curvelet 变换法虽然抑制了噪声,但对比度增强效果并不明显,综合效果不及本文方法。

表 1 红外图像增强的各项定量评价

Table 1 Quantitative evaluation of infrared image enhancement

		Histogram double equalization <sup>[3]</sup>	Second generation wavelet transform <sup>[7]</sup>	Curvelet transform <sup>[8]</sup>	Multiscale Retinex <sup>[11]</sup>	Proposed method
House infrared image	Contrast	0.3021	0.1090	0.1021	0.2030	0.1877
	SRN /dB	7.6741	12.0433	10.6931	6.8704	10.2591
Street infrared image	Contrast	0.3042	0.0620	0.0882	0.1807	0.1528
	SNR /dB	6.6073	8.7590	9.3509	5.1566	9.7812

## 4 结 论

提出了一种基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法,对最大尺度低频子带图像进行多尺度 Retinex 增强,提高了红外图像的全局对比度,改善了视觉效果;根据最大尺度低频子带图像的局部对比度计算高频子带图像的增益系数,增强了图像的细节并抑制了噪声,获得了较好的图像增强整体效果。实验结果表明,本文方法的综合性能优于双向直方图均衡法、二代小波变换法、平稳小波变换法和多尺度 Retinex 法。本文方法可用于交通导航及维护、目标跟踪等领域中红外图像的增强,对于亮度不均匀的含噪图像,增强效果尤为明显。

## 参 考 文 献

- 1 Fei Zhang, Chengfang Li, Lina Shi. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, **46**(4): 323~328
- 2 Uvais Qidwai. Infrared image enhancement using  $H_\infty$  bounds for surveillance applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, **17**(8): 1274~1282
- 3 Chen Qian, Bai Lianfa, Zhang Baomin. Histogram double equalization in infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **22**(6): 428~430  
陈 钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(6): 428~430
- 4 Andrea Polesel, Giovanni Ramponi, V. John Mathews. Image enhancement via adaptive unsharp masking [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **9**(3): 505~510
- 5 Gong Wupeng, Wang Yongzhong. Contrast enhancement of infrared image via wavelet transform [J]. *Chinese Journal of National University of Defense Technology*, 2000, **22**(6): 117~119  
宫武鹏, 王永仲. 一种基于小波变换的红外图像对比度增强技术 [J]. *国防科技大学学报*, 2000, **22**(6): 117~119
- 6 Zhang Changjiang, Fu Mengyin, Jin Mei *et al.*. Approach to enhancement contrast of infrared image based on wavelet transform [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **23**(2): 119~124  
张长江, 付梦印, 金 梅等. 一种红外图像对比度增强的小波变换法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(2): 119~124
- 7 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): 353~356  
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): 353~356
- 8 Jean-Luc Starck, Fionn Murtagh, Emmanuel J. Candès *et al.*. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, **12**(6): 706~717
- 9 Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue *et al.*. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 342~346  
石 丹, 李庆武, 倪 雪等. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 342~346
- 10 Daniel J. Jobson, Zia-ur Rahman, Glenn A. Woodell. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(7): 965~976
- 11 Ying Li, Changzhi Hou *et al.*. Enhancement of infrared image based on the retinex theory [C]. Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Lyon, 2007: 3315~3318
- 12 Cheng Li, Shao Gao, Duyan Bi. A modified image enhancement algorithm based on color constancy [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 784~787
- 13 Zhang Xinming, Shen Lansun. Adaptive image enhancement using wavelets and statistics [J]. *Signal Processing*, 2001, **17**(3): 227~231  
张新明, 沈兰荪. 基于小波和统计特性的自适应图像增强 [J]. *信号处理*, 2001, **17**(3): 227~231
- 14 Stian Solbø, Torbjørn Eltoft. A stationary wavelet-domain wiener filter for correlated speckle [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(4): 1219~1230
- 15 Ma Zhifeng, Wu Qiongzhi, Du Juan. Image enhancement based on the stationary wavelet transformation with rotation, shift and scale invariance [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 98~101  
马志峰, 吴琼之, 杜 娟. 基于旋转、平移和尺度不变的平稳小波图像增强 [J]. *光学技术*, 2009, **35**(1): 98~101
- 16 Gao Shibo, Cheng Yongmei, Zhao Yongqiang *et al.*. Infrared image denoising based on stationary wavelet transform using tensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1818~1823  
高仕博, 程咏梅, 赵永强. 基于张量的平稳小波变换红外图像去噪 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1818~1823
- 17 Wang Yanchen, Li Shujie, Huang Lianqing. Enhancement of radiography based multiscale retinex [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 70~76  
王彦臣, 李树杰, 黄廉卿. 基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 70~76
- 18 Liu Ruijian, Chen Shuyue, Zhang Jiajie. The application of enhanced technology of infrared image based on retinex [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, **28**(4): 193~195  
刘瑞剑, 陈树越, 张甲杰. 多尺度 Retinex 算法在红外图像增强中的应用 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, **28**(4): 193~195
- 19 Zhang Lin, Zhu Zhaoda. A novel nonlinear method for image enhancement based on nonsubsampling contourlet transform [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(8): 1786~1790  
张 林, 朱兆达. 基于非降采样 Contourlet 变换的非线性图像增强新算法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, **31**(8): 1786~1790
- 20 Li Junli, Wei Ping, Hou Yanqin *et al.*. A method for medical image sharpening enhancement based on fuzzy rules and wavelet transformation [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2008, **27**(2): 234~239  
李均利, 魏 平, 侯艳芹等. 一种基于模糊规则和小波变换的医学图像锐化增强算法 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2008, **27**(2): 234~239