

# 结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强

苏娟 李冰\* 王延钊

火箭军工程大学初级指挥学院, 陕西 西安 710025

**摘要** 为了克服天空背景对红外图像增强处理的干扰、更好地凸显图像中的目标,提出了一种结合脉冲耦合神经网络(PCNN)分割和模糊集理论的红外图像增强方法。利用 PCNN 将图像分割成天空背景区域和目标区域,之后对目标区域利用变分 Retinex 处理以获得反射图像,并对该反射图像进行基于岭型分布的自适应模糊增强,将自适应增强后的反射图像与照射图像进行融合,将融合后的目标区域的局部均值赋值给天空背景区域,重构得到增强后的图像。实验结果证明,该方法解决了已有算法中出现的天空区域噪声放大问题,增强后的图像具有更高的对比度和更好的视觉效果。

**关键词** 图像处理; 变分 Retinex; 脉冲耦合神经网络; 模糊集理论

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0910001

## Infrared Image Enhancement Based on PCNN Segmentation and Fuzzy Set Theory

Su Juan Li Bing Wang Yanzhao

*Elementary Command College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China*

**Abstract** To overcome the interference of the sky background in infrared image enhancement, and highlight the target in the image, an infrared image enhancement method based on pulse coupled neural network (PCNN) segmentation and fuzzy set theory is proposed. The PCNN is utilized to segment the image into sky background region and target region. The adaptive fuzzy enhancement method based on ridge type distribution is used to enhance the target region reflectance image obtained by variation Retinex, and the enhanced reflectance image and the illumination image are fused together. The local average value of target region is assigned to the sky background region, and the enhanced image is acquired by the reconstruction of the target region and the sky background region. Experimental results demonstrate that the proposed method can overcome the noise amplification problem of existing algorithm in sky region, and the enhanced images have high contrast and good visual effects.

**Key words** image processing; variational Retinex; pulse coupled neural network; fuzzy set theory

**OCIS codes** 100.2980; 330.1720; 100.4996; 100.2960

## 1 引 言

红外成像制导具备灵敏度高、隐蔽性好、抗干扰能力强等优良特性,能提高武器的生存能力和精确打击能力,使得红外成像制导成为当前精确制导技术发展的主流和研究热点<sup>[1]</sup>。但是,受成像仪器的灵敏度、分辨率、参数设定以及外界不良环境等影响,采集到的红外图像会出现对比度较低、模糊度较高、视觉效果较差等问题,进而对红外目标匹配识别造成不良影响。因此,对红外图像进行增强具有重要意义。

当前用于红外图像增强的算法很多<sup>[2]</sup>,其中 Retinex 算法作为新兴的算法被广泛应用于图像增强领域。Retinex 理论即视网膜大脑皮层理论,是基于人类视觉系统<sup>[3]</sup>(HVS)理论的一种图像增强方法,由 Land 等<sup>[4]</sup>于 20 世纪 70 年代提出,其理论实质是从原始图像中去除照射光的影响来获得物体的反射性质,以获得图像的内

**收稿日期:** 2016-03-18; **收到修改稿日期:** 2016-04-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(61302195)

**作者简介:** 苏娟(1973—),女,博士,副教授,研究生导师,主要从事遥感图像处理和目标识别方面的研究。

E-mail: suj04@mails.tsinghua.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: libingbenyi@163.com

在性质。该理论提出后,又出现了基于中心环绕的 Retinex 算法,主要包括单尺度 Retinex(SSR)<sup>[5]</sup>、多尺度 Retinex(MSR)<sup>[6]</sup>算法等。为了解决传统 Retinex 算法造成的边缘模糊或光晕现象等问题,Kimmel 等<sup>[7]</sup>提出了可变框架 Retinex 算法,Rahman 等<sup>[8-15]</sup>对 SSR、MSR、变分 Retinex 算法进行了改进,达到了更好的图像增强效果。但是,当图像中天空背景占的比例过大、高大建筑物目标占的比例较小且目标与背景的灰度值比较接近时,已有算法在增强目标对比度的同时也放大了天空背景中的噪声,甚至使得天空背景区域出现明显的条纹状,既降低了图像视觉效果,又会降低后续基于边缘或梯度特征的目标匹配识别的准确度。

为了降低天空背景对红外图像增强的影响,针对天空背景比例较大、建筑物目标比例较小的红外图像,提出了一种结合脉冲耦合神经网络(PCNN)分割和模糊集理论的红外图像增强方法。采用 PCNN 将图像分割成目标区域和天空背景区域,再利用变分 Retinex 和自适应模糊增强方法对目标区域进行增强处理,并对目标区域与背景区域进行重构获得最终的增强图像。

## 2 算法原理

如图 1 所示,本文算法主要包括三部分:1)基于 PCNN 的图像分割;2)用变分 Retinex 方法获得目标区域的反射图像,并利用基于岭型分布的模糊理论对反射图像进行对比度拉伸;3)目标区域与天空背景区域的重构。

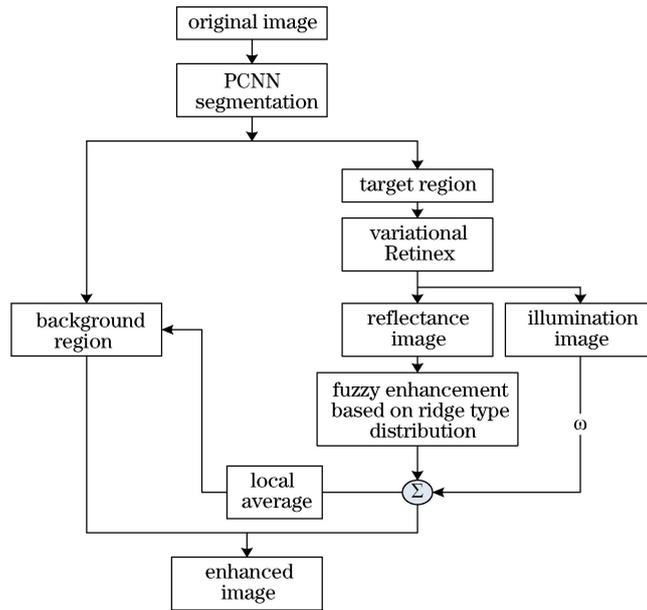


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

### 2.1 基于脉冲耦合神经网络的图像分割

1990 年,Eckhorn 在猫眼视觉机制基础上提出了 Eckhorn 神经元模型,之后该模型被引入到图像处理中。1999 年,Johnson 等<sup>[16-18]</sup>对 Eckhorn 神经元模型进行了改进,得到脉冲耦合神经元模型,相应的网络称为脉冲耦合神经网络。

PCNN 的数学模型表示为

$$F_{ij}(n) = \exp(-\alpha_F \Delta t) F_{ij}(n-1) + S_{ij} + V_F \sum_{k,l} M_{ijkl} Y_{kl}(n-1), \quad (1)$$

$$L_{ij}(n) = \exp(-\alpha_L \Delta t) L_{ij}(n-1) + V_L \sum_{k,l} M_{ijkl} Y_{kl}(n-1), \quad (2)$$

$$U_{ij}(n) = F_{ij}(n) [1 + \beta L_{ij}(n)], \quad (3)$$

$$\theta_{ij}(n) = \exp(-\alpha_\theta \Delta t) \theta_{ij}(n-1) + V_\theta Y_{ij}(n-1), \quad (4)$$

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, & U_{ij}(n) > \theta_{ij}(n) \\ 0, & U_{ij}(n) \leq \theta_{ij}(n) \end{cases}, \quad (5)$$

式中下标  $ij$  为神经元标号,  $F_{ij}$ 、 $S_{ij}$ 、 $L_{ij}$ 、 $U_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别表示神经元  $ij$  的馈送输入、外部刺激、链接输入、内部激活(即前突触势)、动态阈值,  $\mathbf{M}$  为连接权矩阵,  $V_F$ 、 $V_L$ 、 $V_\theta$  为幅度常数,  $\alpha_F$ 、 $\alpha_L$ 、 $\alpha_\theta$  分别为馈送输入、链接输入和动态阈值相应的衰减系数,  $\beta$ 、 $\Delta t$ 、 $n$  分别为链接系数、时间常数、迭代次数,  $Y_{ij}$  为输出值。

在对图像进行处理时, PCNN 利用图像像素相似强度的邻近相似性来实现邻接神经元的被捕获点火, 进而触发邻接相似神经元的集体点火, 这些点火的神经元形成一个神经元集群, 并对应图像中具有相似性质的一个区域。当迭代结束时, 即完成了对图像的分割工作。

在原始图像中提取出利用 PCNN 分割出的目标区域的外接矩形, 然后以此矩形为基础进行后续的图像处理工作。图 2 为一幅红外图像进行 PCNN 分割后的结果。从图中可知, 经过分割以后, 图像中的天空背景区域和目标区域得到了有效地分离。

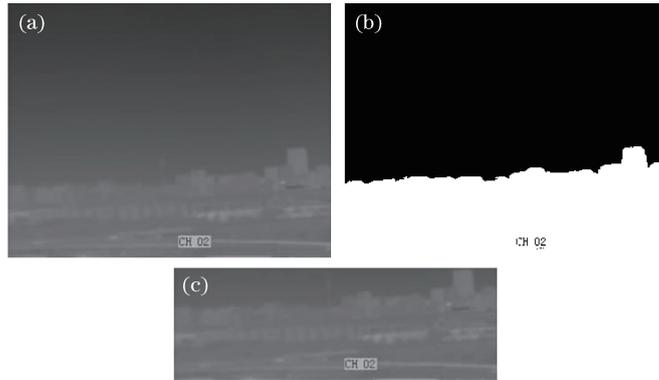


图 2 红外图像的 PCNN 分割。(a)原始红外图像;(b)PCNN 分割结果;(c)目标区域的外接矩形

Fig. 2 PCNN segmentation of an infrared image. (a) Original infrared image; (b) segmentation result of PCNN; (c) enclosing rectangle of the target region

## 2.2 变分 Retinex

变分 Retinex 由 Kimmel 等<sup>[7]</sup>于 2003 年提出, Kimmel 根据 Retinex 理论的 5 个假设得到如下惩罚函数, 即变分框架的 Retinex 算法(VFR), 简称为变分 Retinex。

$$\min_l F[l] = \int_{\Omega} [|\nabla l|^2 + \alpha (l - s)^2 + \beta |\nabla(l - s)|^2] dx dy, \text{ s.t. } l \geq s \text{ and } \langle \nabla l, \mathbf{n} \rangle = 0 \text{ on } \partial\Omega. \quad (6)$$

式中  $\Omega$ 、 $\partial\Omega$ 、 $l$ 、 $s$  和  $\mathbf{n}$  分别表示图像空间、图像边缘、照射图像、原始图像和边缘法向量,  $\alpha$ 、 $\beta$  为代价因子,  $|\nabla l|^2$  使照度图像在空间域内保持平滑,  $(l - s)^2$  为保真项,  $l$  与  $s$  之间的差是反射图。  $|\nabla(l - s)|^2$  类似于贝叶斯表达式, 是保证反射图像连续的正则项, 使获得的反射图像更符合视觉特性。通常使用投影归一化最速下降法(PNSD)求解上述方程, 完成对照射分量的估计, 但就整体而言, 该算法效率偏低。为了提高算法效率, 文献<sup>[7]</sup>中采用多尺度的 PNSD 对  $F[l]$  函数进行求解, 证明了变分 Retinex 可以有效地解决传统 Retinex 算法在进行图像增强时产生光晕的问题, 且运算效率较高。

## 2.3 基于岭型分布的模糊增强方法

通过变分 Retinex 获得的目标区域的反射图像  $I$  整体较灰暗, 需要对其进行对比度拉伸来增强图像质量, 便于目标突显出来。用于对比度拉伸的方法很多, 其中 1965 年美国控制论专家 Zadeh 提出的模糊集理论能够很好地描述图像的不确定性, 并且噪声具有较好的稳健性, 因此模糊集理论适用于图像增强领域。模糊集理论最早被 Pal 和 King 用来提取图像细节信息, 以实现图像边缘增强<sup>[18]</sup>, 但是该算法中存在强制剪切而导致灰度信息丢失的问题, 以至于图像增强效果不明显<sup>[19]</sup>。因此, 本文针对红外图像整体较灰暗、目标不突出的问题提出了改进的模糊增强方法。该方法主要分为三部分: 图像的模糊特征提取, 模糊增强和逆变换。

### 1) 图像的模糊特征提取

在模糊逻辑中, 采用隶属度函数来反映模糊集合中元素隶属程度。所采用的岭型分布的隶属度函数将反射图像  $I$  从空间域变换到模糊域, 获得模糊特征  $\{\phi\}$ , 且模糊特征中的任一元素  $\{\phi(i, j)\}$  的值均在  $[0, 1]$  内。定义岭型分布的隶属度函数为

$$\phi(i, j) = F[I(i, j)] = \begin{cases} 0, & I(i, j) \leq I_u \\ 0.5 + 0.5 \sin \frac{\pi}{I_d - I_u} \left[ I(i, j) - \frac{I_d + I_u}{2} \right], & I_u < I(i, j) \leq I_d \\ 1, & I_d < I(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

利用变分 Retinex 得到的反射图像的直方图近似服从正态分布<sup>[12]</sup>, 那么根据正态分布特性可以利用图像的均值  $\mu$  和标准差  $v$  来确定截取位置的上限  $I_d$  和下限  $I_u$ 。令  $I_d = \mu + d \times v, I_u = \mu - d \times v, d$  的取值范围为 2~3。

Pal 等提出的模糊增强方法中的隶属度函数需要人为设定两个变换系数, 且这两个变换系数直接影响着增强结果, 而本文所采用的岭型分布隶属度函数是利用图像的直方图分布来设定变换范围, 且变换参数由图像的直方图分布决定, 因此本文方法具有自适应性。另外, Pal 等所采用的隶属度函数存在硬性剪切, 会丢失部分灰度信息, 而本文方法是对所有灰度信息进行处理, 不会丢失灰度信息。

### 2) 模糊增强

利用模糊增强算子的回归调用来修正隶属度, 可以获得新的模糊特征  $\{\phi'\}$ , 公式为

$$T^{(1)}(\phi(i, j)) = \begin{cases} 2[\phi(i, j)]^2, & 0 \leq \phi(i, j) \leq 0.5 \\ 1 - 2[1 - \phi(i, j)]^2, & 0.5 < \phi(i, j) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\phi'(i, j) = T^{(n)}[\phi(i, j)] = T\{T^{(n-1)}[\phi(i, j)]\}, \quad (9)$$

式中  $T^{(n)}$  表示  $T$  函数的  $n$  次迭代运算。

利用基于岭型分布的模糊增强方法对大量红外图像进行增强实验, 分析所有的实验结果得出, 在本文应用背景下, 该模糊增强方法的最佳迭代次数为  $n=3$ 。其中一组数据的实验结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 随着迭代次数的增加, 图像的视觉效果越来越好, 目标变得越来越突出, 但当迭代次数  $n=4$  时, 图像出现失真。

### 3) 逆变换

对模糊特征  $\{\phi'\}$  进行逆变换, 将其从模糊域内变换回空间域, 得到模糊增强后的图像  $I_{out}$ 。变换公式为

$$I_{out}(i, j) = \mathcal{F}^{-1}[\phi'(i, j)] = 4v/\pi \times \arcsin[2\phi'(i, j) - 1] + \phi'(i, j), \quad 0 \leq \phi'(i, j) \leq 1, \quad (10)$$

式中  $\mathcal{F}^{-1}$  表示逆运算。

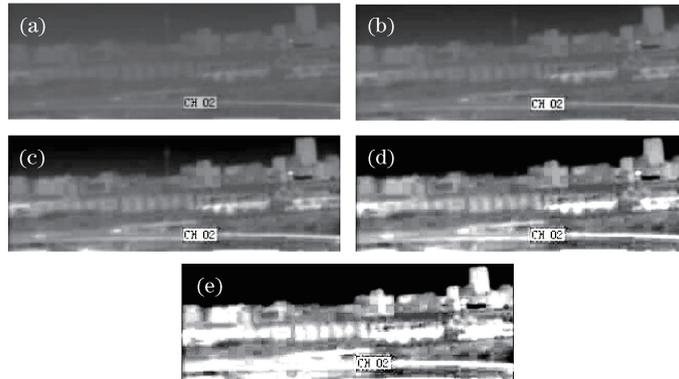


图 3 不同迭代次数下的模糊增强结果。(a) 目标区域的反射图像; (b)  $n=1$ ; (c)  $n=2$ ; (d)  $n=3$ ; (e)  $n=4$

Fig. 3 Fuzzy enhancement results with different iteration numbers. (a) Reflectance image of the target region; (b)  $n=1$ ; (c)  $n=2$ ; (d)  $n=3$ ; (e)  $n=4$

为了验证基于岭型分布的模糊增强方法的有效性, 与文献[19]中改进的模糊增强方法进行了对比。在图 4(a)中, 1~3 行分别为在三个不同时刻下所获得得红外图像, 图 4(b)为采用文献[19]中改进的模糊增强方法处理后的结果, 图 4(c)为采用本文方法处理后的结果。由图 4(b)可知, 文献[19]中改进的模糊增强方法虽然能提高图像的对比度, 但是图中的噪声被放大、图像变得模糊。由图 4(c)可知, 利用本文方法能够有效地提高图像的对比度, 并且在一定程度上抑制了天空背景中噪声被放大的现象, 增强后的图像中目标更清晰, 视觉效果更好。

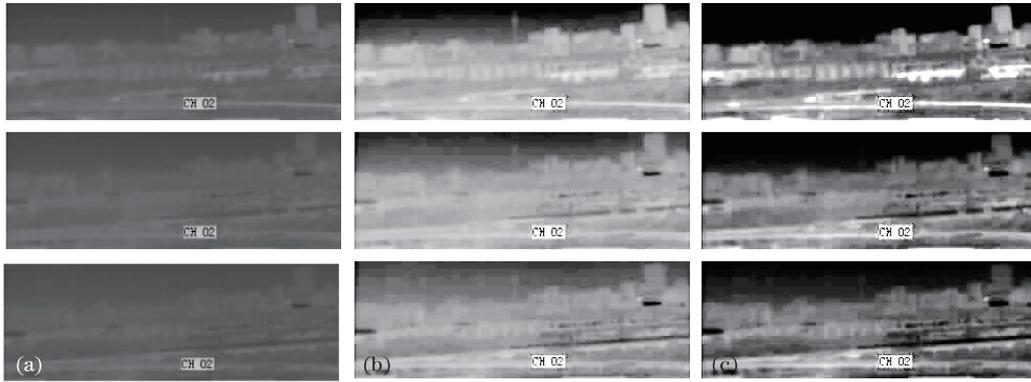


图 4 模糊增强结果。(a)目标区域的反射图像;(b)文献[19]处理结果;(c)本文方法处理结果

Fig. 4 Results with the fuzzy enhancement algorithm. (a) Reflectance images of the target region; (b) results with the Ref. [19] method; (c) results with the proposed method

## 2.4 图像重构

### 2.4.1 反射图像与照射图像的融合

由于照射图像中包含场景的很多细节信息,但是经过对比度拉伸后的反射图像可能出现细节丢失,为了保留尽可能多的细节信息,以便于为下一步图像处理提供更多的特征信息,采用像素级融合方法对增强后的反射图像  $I_{out}$  与照射图像  $I_z$  进行融合处理。利用(11)式对增强后的反射图像  $I_{out}$  和照射图像  $I_z$  进行加权平均方法进行融合,获得新的目标区域图像  $I_r$ 。

$$I_r = \lambda \times I_z + (1 - \lambda) \times I_{out}, \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为加权系数,  $0 \leq \lambda \leq 1$ , 且  $\lambda$  的值可以根据实际情况进行调整。通过大量图像进行实验验证,得出  $\lambda$  的取值在 0.3~0.5 之间时,图像  $I_r$  的效果最佳。

### 2.4.2 天空区域的赋值

目标区域图像  $I_r$  需要与天空背景区域进行重构来得到增强后的整幅图像。若天空背景的原有像素值保持不变,则重构后的图像在目标区域与背景区域的衔接处会出现非常明显的断层,且整幅图像的视觉效果较差,如图 5(a)所示。

为了使两个区域衔接得更自然,重构之后的图像视觉效果更好,需要对天空背景区域的像素值进行重新赋值。分析目标区域可知,目标区域的顶部仍存在部分天空场景,且天空场景与目标场景对比度很明显。将目标区域顶部的前  $x$  行( $x$  的取值与目标区域中天空场景所占比例有关,比例越小, $x$  的值越小;反之, $x$  的值越大)像素值的均值赋给天空背景区域的各像素点,使得背景区域的像素值接近目标区域顶部的像素值,进而使得两个区域衔接处自然过渡,重构后的图像有更好的视觉效果。目标区域与被重新赋值后的天空区域的重构结果如图 5(b)所示,在该组实验中  $x$  的值为 2。由图 5 可以看出,天空区域经重新赋值后所得到的重构图像中没有明显的断层且视觉效果很好。

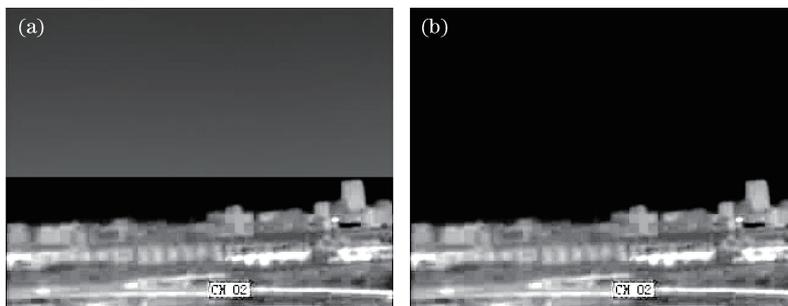


图 5 图像重构结果。(a)天空背景值不变时的重构结果;(b)天空背景经重新赋值后的重构结果

Fig. 5 Results of the image reconstruction. (a) Reconstruction result with unchanged value of sky; (b) reconstruction result with reassigned value of sky

## 2.5 本文算法

本文算法步骤如下:

- 1) 利用 PCNN 将图像分割成目标区域和天空背景区域;
- 2) 对目标区域进行变分 Retinex 运算, 获得反射图像  $I_r$  和照射图像  $I_z$ ;
- 3) 用基于岭型分布的模糊理论对反射图像进行对比度拉伸, 获得增强后的反射图像  $I_{out}$ ;
- 4) 利用(11)式对增强后的反射图像  $I_{out}$  和照射图像  $I_z$  进行融合, 得到新的目标区域图像  $I_r$ ;
- 5) 求图像  $I_r$  的局部均值, 将求得的均值赋给天空背景区域, 得到新的天空背景区域图像  $I_g$ ;
- 6) 由目标区域图像  $I_r$  与天空背景区域图像  $I_g$  重构得到增强后的整幅图像。

## 3 实验结果及分析

进行了大量实验以验证所提算法的有效性。程序运行环境为 Matlab 2010b, 实验数据为  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  大小的对比度低、视觉效果差的红外图像序列。只列出了 3 组图像的实验结果, 这三幅图像是由法国 SOFRADIR 公司生产的 M3 中波制冷红外成像仪在同一天的不同时刻拍摄所得, 其成像时间分别是 17 时、19 时和 21 时, 且三幅图像的图像质量依次下降。

将本文算法与文献[14]算法、变分 Retinex 算法进行了对比实验。实验结果如图 6 所示, 图中 1~3 行分别表示 17 时、19 时和 21 时拍摄的红外图像以及经过以上算法的增强结果。由于受红外成像仪自身参数、成像时外界环境影响, 获得的红外图像中天空区域存在大量噪声, 已有的 Retinex 算法通常对整幅图像进行增强处理, 使得天空中的噪声被放大, 甚至出现很明显的条纹状, 如图 6(b)~(c) 所示, 这不但降低图像质量, 还增强了天空区域内的边缘、梯度特征, 进而对后续匹配工作造成不良影响。本文算法处理结果如图 6(d) 所示, 从图中可以看出, 相比于文献[14]算法和变分 Retinex 算法处理的结果, 本文算法目标识别度更高、图像更清晰、且天空处的噪声几乎未被放大, 增强效果更好。另外, 与文献[14]算法相比, 本文算法还克服了 Retinex 处理图像过程中出现的光晕现象; 与变分 Retinex 相比, 本文算法的增强效果更显著。

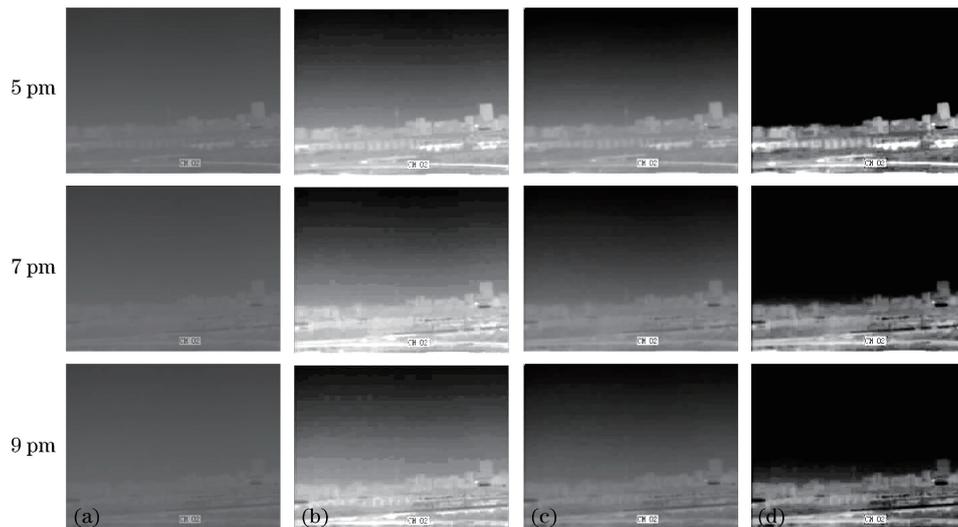


图 6 不同算法的增强结果。(a)原始红外图像;(b)文献[14]算法增强结果;  
(c)VFR 算法增强结果;(d)本文算法增强结果

Fig. 6 Enhancement results with different methods. (a) Original infrared images; (b) enhancement results with the Ref. [14] method; (c) enhancement results with VFR method; (d) enhancement results with the proposed method

采用均方根对比度和边缘强度对图像增强效果进行定量分析。对比度是指一幅图像中最亮和最暗之间不同亮度层级的测量, 对比度越大说明目标越清晰、图像增强效果越好。图像经不同算法增强后的均方根对比度结果如表 1 所示。由表 1 可知, 本文算法获得的图像的对比度明显高于变分 Retinex 算法, 说明本文算法的增强效果明显优于变分 Retinex 算法; 与文献[14]算法处理后得到的对比度比较接近, 但是目视判读可知, 文献[14]算法所得的图像整体灰度值较大, 且目标区域较模糊, 故本文算法的增强效果优于文献[14]算法。

表 1 不同算法增强后的图像对比度  
Table 1 Contrast of enhanced image with different methods

	Original image	Method		
		Ref.[14] method	VFR method	Proposed method
5 $\mu\text{m}$	20.8739	69.4754	59.2453	75.4555
7 $\mu\text{m}$	16.6447	63.4179	49.2226	65.7657
9 $\mu\text{m}$	14.2893	60.5690	43.3107	58.9551

边缘强度能反映目标的轮廓细节,通常边缘强度越大,相对于背景,目标区分度越好。选用局部边缘强度对图像效果进行验证。选出目标的外接矩形  $T$ ,那么局部区域则是与  $T$  同一中心且面积为  $T$  两倍的矩形区域。图像经不同算法增强后的局部边缘强度如表 2 所示。可以看出,经过本文算法增强处理的图像的局部边缘强度要明显大于原图以及经过文献[14]算法和变分 Retinex 算法处理后的图像的局部边缘强度。

表 2 不同算法增强后的局部边缘强度  
Table 2 Local edge intensity of enhanced image with different methods

	Original image	Method		
		Ref.[14] method	VFR method	Proposed method
5 $\mu\text{m}$	10.1468	35.2489	27.4490	76.7970
7 $\mu\text{m}$	6.2313	31.4179	17.2907	49.5066
9 $\mu\text{m}$	5.1051	28.3499	14.5886	46.7602

对红外图像进行增强的目的是提高图像对比度、从而有利于后续的红外图像匹配工作。以原图、文献[14]算法结果图、变分 Retinex 算法结果图和本文方法结果图为基础进行匹配,分别对比 4 种匹配结果来验证本文方法的实用性。采用基于边缘强度的匹配算法进行实验验证,实验数据为图 6 所示的 12 张图像,匹配结果如图 7 所示。图 7(a)为可见光模板,2~4 列分别是图 6 中对应图像的匹配结果。由图 7 可知,在原图和文献[14]算法结果图以及变分 Retinex 方法结果图匹配中出现了匹配错误等问题,而利用本文方法增强后的图像匹配位置准确且精度较高,达到了增强图像的目的。

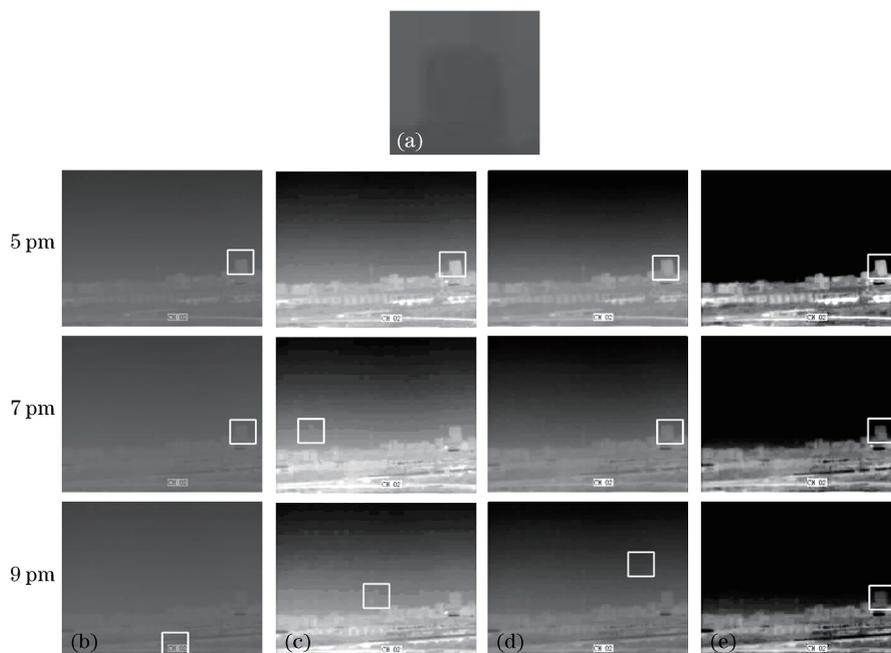


图 7 基于边缘强度的模板匹配实验。(a)目标模板;(b)原始图像匹配结果;(c)文献[14]算法增强匹配结果;  
(d)VFR 算法增强匹配结果;(e)本文算法增强匹配结果

Fig. 7 Matching experiments based on edge intensity. (a) Target template; (b) matching results of the original infrared images; (c) matching results after enhancement with the Ref. [14] method; (d) matching results after enhancement with VFR method; (e) matching results after enhancement with the proposed method

## 4 结 论

针对天空为大背景、高大建筑物占的比例较小、图像质量低的红外图像,提出了一种结合 PCNN 分割和模糊集理论的红外图像增强算法。与已有算法对图像进行全局或者分层增强不同,所提算法采取了分区域增强策略:利用基于图像像素相似强度邻近相似性的 PCNN 将图像分割成目标区域和天空背景区域,之后对目标区域依次进行变分 Retinex 运算和反射分量的自适应模糊增强,以提高目标区域的对比度,并融合照射分量来尽可能多地保留原图像的细节信息;同时将增强后的目标区域的局部均值赋值给天空背景区域,以实现目标区域与天空区域的重构。实验结果表明,所提算法更好地改善了红外图像的整体视觉效果、提高了图像的对比度,并且解决了天空背景中噪声被放大进而阻碍后续匹配工作的问题、提高了后续红外制导匹配的准确度和精度。

## 参 考 文 献

- Zhu Xianwei. Study on structure features based registration of multi-sensor images[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.  
朱宪伟. 基于结构特征的异源图像配准技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0209001.  
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, 42(2): 0209001.
- Zhu Guoqing, Li Qingwu, Lin Shaofei, *et al.* Infrared image enhancement algorithm based human visual system characteristic via non-subsampled Contourlet transform domain[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011001.  
朱国庆, 李庆武, 林少飞, 等. 基于人眼视觉特性的非下采样轮廓波变换域红外图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011001.
- Land E H, McCann J. Lightness and retinex theory[J]. Journal of Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G 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.
- Kimmel R, Elad M, Shaked D, *et al.* A variational framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- Rahman Z U, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- Jang J H, Kim S D, Ra J B. Enhancement of optical remote sensing images by subband-decomposed multiscale Retinex with hybrid intensity transfer function[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 983-987.
- Wang L Q, Xiao L, Liu H Y, *et al.* Variational bayesian method for retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(8): 3381-3396.
- Wang Ronggui, Zhang Xuan, Zhang Xinlong, *et al.* A novel adaptive Retinex algorithm for image enhancement[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2933-2936.  
汪荣贵, 张 璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2933-2936.
- 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.  
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.
- Zhao Hongyu, Xiao Chuangbai, Yu Jing, *et al.* A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 1048-1055.  
赵宏宇, 肖创柏, 禹 晶, 等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(4): 1048-1055.
- Wu Yiquan, Shi Junpeng. Image enhancement in non-subsampled Contourlet transform domain based on multi-scale Retinex[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0310002.  
吴一全, 史俊鹏. 基于多尺度 Retinex 的非线性采样 Contourlet 域图像增强[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0310002.
- Li Yi, Zhang Yunfeng, Li Ning, *et al.* Adaptive detail enhancement for infrared image based on subband-decomposed

- multi-scale Retinex[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0512001.
- 李 毅, 张云峰, 李 宁, 等. 基于子带分解多尺度 Retinex 的红外图像自适应细节增强[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0512001.
- 16 Johnson J L, Padgett H J, Arddt M, *et al.* PCNN model and applications[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 480-498.
- 17 Kuntimad G, Ranganath H S. Perfect image segmentation using pulse coupled neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 591-598.
- 18 Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1981, 11(7): 494-501.
- 19 Yun Haijiao, Wu Zhiyong, Wang Guanjun, *et al.* Enhancement of infrared image combined with histogram equalization and fuzzy set theory[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(8): 1498-1505.
- 云海姣, 吴志勇, 王冠军, 等. 结合直方图均衡和模糊集理论的红外图像增强[J]. 计算辅助设计与图形学学报, 2015, 27(8): 1498-1505.