

文章编号 1004-924X(2014)07-1962-07

## 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节

赵文达<sup>1,2</sup>, 续志军<sup>1\*</sup>, 赵建<sup>1</sup>, 王鹤<sup>1</sup>, 王飞<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 总装备部工程兵技术装备研究所, 无锡 214035)

**摘要:**针对红外图像信噪比低、目标边缘和细节模糊等缺点,提出了一种基于梯度直方图变换增强红外图像细节的方法。通过分析红外图像的梯度直方图,构造出一个高斯函数来扩展梯度直方图,增大图像的梯度值。采用直方图规定化法,实现图像的梯度直方图规定化,得到变换的梯度场。在从变换的梯度场重建增强的图像时,引入全变分(TV)模型来抑制噪声。实验结果表明,提出算法的图像信息熵比灰度直方图均衡化和规定化算法显著提高,明显增强了红外图像的纹理细节,为目标检测、跟踪和识别提供了高质量的图像信息。提出的算法采用有限差分法迭代进行求解和 Visual C++ 编程,对大小为 480 pixel×480 pixel 的图像的处理时间约为 40 ms,基本达到了工程应用对图像处理的要求。

**关键词:** 图像处理; 红外图像增强; 梯度直方图变换; 全变分

中图分类号: TP391 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20142207.1962

## Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform

ZHAO Wen-da<sup>1,2</sup>, XU Zhi-jun<sup>1\*</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, WANG He<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>3</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi, 214035, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** According to typical problems of low signal to noise ratio and fuzzy edges of target details in an infrared image, this article proposes a infrared image enhancement algorithm for image details based on gradient histogram transform. By analyzing the gradient histogram of the infrared image, a Gaussian function to extend the gradient histogram was constructed to increase the gradient value. By using the histogram specification method to realize the image gradient histogram specification, the transform gradient field was obtained. The Total Variation (TV) model was introduced to control the noise while reconstructing the gradient field. The experiment results indicate that the image information entropy of the algorithm is improved significantly as compared with that of histogram equalization method and specification method. Therefore, it enhances image details and gives qualified image information for target detection, tracking and identification. Based on the finite difference

收稿日期: 2013-07-26; 修订日期: 2013-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61137001)

iteration and Visual C++ programming, the proposed algorithm has image processing time of about 40 ms for an image with the size of 480 pixel  $\times$  480 pixel, which satisfies the requirements of engineering applications in image processing.

**Key words:** image processing; infrared image enhancement; gradient histogram transform; total variation

## 1 引言

红外成像技术能反映物体的热辐射,具有隐蔽性好且可夜视等特点,已被广泛地应用于军事、医疗和科研等领域。但其光敏响应的不均匀性,系统的非线性以及易受外界环境干扰等特性使得红外探测器件获得的图像具有噪声大,目标边缘模糊和纹理细节不清楚等缺点,给目标识别和跟踪带来了诸多不便。因此,对红外图像进行增强处理以改善图像质量具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

已有的图像增强算法很多<sup>[3-5]</sup>,其中,直方图均衡化是一种常见的算法。它将图像灰度值以相等的概率分布在直方图上来扩展灰度直方图的分布范围,增强图像对比度;然而,它容易产生过增强,使图像过亮而将微弱信息丢掉。许多改进的方法均在一定程度上克服了均衡化方法的上述不足,如对直方图保持亮度不变<sup>[6]</sup>的约束和加权限制<sup>[7]</sup>等,但这些方法还是不能突出重要部分的灰度区间。直方图规定化法可以通过事先确定的函数指导灰度值的映射,使直方图成为规定的形状,突出重要部分的灰度区间,以达到增强图像的目的。如果灰度值函数选择恰当,即可以取得很好的增强效果<sup>[8]</sup>。目前,应用变分偏微分方程增强图像细节的方法主要是利用像素点的特征,进而设计自适应扩散函数来保留或平滑图像细节,而人类视觉对图像的局部细节信息变化(梯度)敏感,通过对图像梯度的调整可以实现图像细节的增强。为了有效地增强图像的纹理细节,本文将直方图规定化方法推广到图像的梯度域,对图像的梯度直方图进行变换,提出了基于梯度直方图变换的红外图像细节增强算法。

本文第 2 节首先分析了纹理细节模糊的红外图像的梯度直方图的特点,并说明应用高斯函数扩展梯度直方图增强图像细节的原理;然后采用直方图规定化方法实现了图像的梯度直方图规定化,并得到变换的梯度场。第 3、4 节采用有限差

分迭代法从变换的梯度场重建出增强的图像,给出与灰度直方图均衡化算法和规定化算法对比的实验结果,验证了本算法的优越性。第 5 节总结了本文提出的算法。

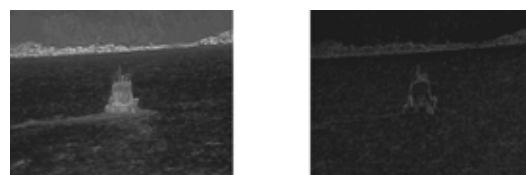
## 2 梯度直方图变换模型

根据已有的研究,图像的梯度值和图像的视觉效果有重要联系,即图像的细节纹理越明显,其梯度值就较大<sup>[9]</sup>。对于一幅红外图像:

$I(x, y) ((x, y) \in \Omega = [0, N-1] \times [0, M-1])$ , 点  $p \in \Omega$  的梯度表示为:

$$\nabla I_p = \left[ \frac{\partial I_p}{\partial x}, \frac{\partial I_p}{\partial y} \right] p = (i, j) \in \Omega. \quad (1)$$

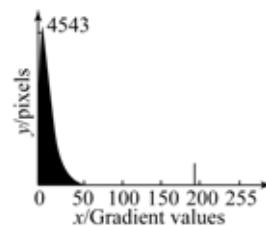
图像中每个像素点的梯度组成了梯度矢量场,其中:梯度值代表灰度变化的速度,矢量方向代表灰度朝哪个方向变化。计算出各梯度值的像素总数,并画出梯度值与像素数的对应关系图,则该图为图像的梯度直方图。图 1 给出了一幅轮船红外图像的梯度幅度场和梯度直方图。



(a) 红外原图

(b) 梯度幅度场

(a) Original infrared image (b) Gradient magnitude field



(c) 梯度直方图

(c) Gradient histogram

图 1 红外图像的梯度幅度场和梯度直方图

Fig. 1 Gradient magnitude field and gradient histogram of infrared image

通过对大量纹理细节不清楚的红外图像的研究发现,它们的梯度直方图的形状是一个窄的单峰,并且峰值靠近梯度值为零的方向,如图 1(c)所示。如果将它的峰型变得平缓,梯度值就会向值大的方向延伸,图像的纹理细节也会越清楚。本文选用高斯函数作为规定化函数,定义为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < +\infty), \quad (2)$$

其中:  $x$  为随机变量;  $\mu$  和  $\sigma$  为高斯函数的参数; 高斯函数  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  扩展为梯度直方图  $p(x)$  的原理,如图 2 所示。

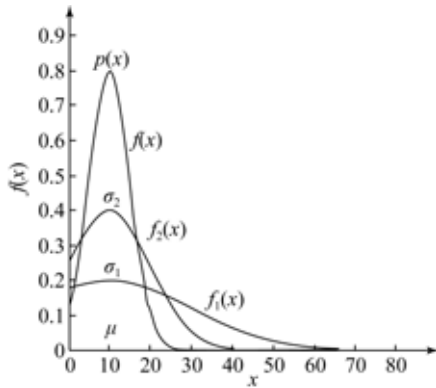


图 2 高斯函数扩展梯度直方图的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of extended gradient histogram for Gaussian function

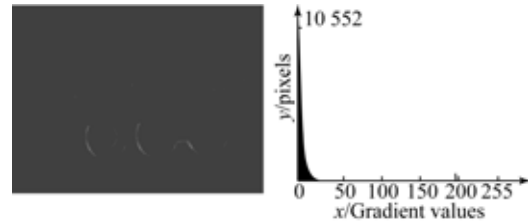
图 2 中,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2$ 。从图 2 可以看出,  $\mu$  用于调整高斯峰的位置;  $\sigma$  决定峰的平缓程度,即  $\sigma$  越大,峰形越平缓。本文  $\mu, \sigma$  分别为:

$$\mu = \sum_{r^T=0}^{l-1} r^T p(r^T), \quad (3)$$

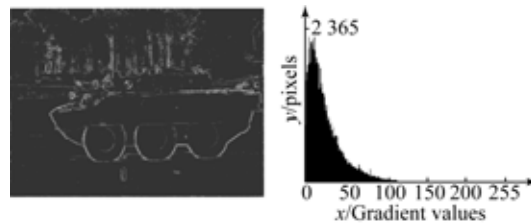
$$\sigma = 1 / \left\{ \beta \left[ \sum_{r^T=0}^{l-1} (r^T - \mu)^2 p(r^T) \right]^{1/2} \right\}, \quad (4)$$

其中:  $r^T$  表示图像的梯度值;  $l$  表示梯度的最大值;  $p(r^T)$  为图像梯度值  $r^T$  的概率密度;  $\beta$  为常数。从图 2 还可以看出,红外图像的梯度值小,选  $\mu$  作为梯度平均值,可以自适应地将高斯峰落在小梯度值范围;红外图像的梯度直方图越窄,梯度值的均方差就越小,式(4)中对应的  $\sigma$  就越大,则峰形就越平缓,直方图越向梯度值大的方向扩展,图像细节增强越明显。为了防止增强的图像过于锐化,取  $\beta=1.5$ 。这里给出一个例子,图 3 分别展示了图 5(上)装甲车图像的梯度幅度场和经过

高斯函数规定化的梯度幅度场,以及它们的梯度直方图。



(a) 原梯度幅度场 (b) 原梯度直方图  
(a) Original gradient magnitude field (b) Original gradient histogram



(c) 规定化的梯度幅度场 (d) 规定化的梯度直方图  
(c) Specification gradient magnitude field (d) Specification gradient histogram

图 3 装甲车的梯度幅度场和梯度直方图

Fig. 3 Field gradient magnitudes and gradient histograms of armored car

从图 3 可以看出,像上面提到的那样,原图像的梯度直方图(图 3(b))是一个窄的单峰,且梯度值小,图像细节的轮廓模糊,和图 3(a)对应。经过高斯函数对梯度直方图规定化后,梯度直方图的峰形变得平缓,梯度值增大了,如图 3(d)所示,对应的图像细节轮廓清楚了,和图 3(c)对应。

有了高斯函数,就可以用它指导梯度直方图变换<sup>[10]</sup>,计算步骤如下:

(1)按式(5)计算原梯度值  $r_k^T$  的变换梯度值  $s_k^T$ :

$$s_k^T = T(r_k^T) = \sum_{i=0}^k p(r_i^T) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i^T}{n^T}, \quad (5)$$

其中:  $0 \leq s_k^T \leq 1, k=0, 1, \dots, l-1$ ;  $n_i^T$  表示梯度值为  $r_i^T$  的像素数;  $n^T$  表示像素的总个数;  $p(r_i^T)$  表示梯度值的概率密度;  $T(r_k^T)$  表示概率密度和。

(2)按照式(6)计算出图像的输出梯度值  $z_k^T$  和按高斯函数变换的梯度值  $v_k^T$ :

$$v_k^T = G(z_k^T) = \sum_{i=0}^k f(z_i^T). \quad (6)$$

(3)根据文献[11]的映射规则,找到  $v_k^T \rightarrow s_k^T$

的对应关系,按照式(7)计算出目标梯度值  $z_k^T$ :

$$z_k^T = G^{-1}(s_k^T), \quad (7)$$

其中:  $G^{-1}$  表示对  $G$  求逆变换。

根据上述计算步骤计算出原图像每个规定化后的梯度值。这些梯度值和其对应的矢量方向组成了图像的规定化梯度场  $\mathbf{G}$ :

$$\mathbf{G} = S(|\nabla u_0|) \cdot \frac{\nabla u_0}{|\nabla u_0|}, \quad (8)$$

其中:  $u_0$  表示原红外图像;  $|\nabla u_0|$  表示原红外图像的梯度值;  $\nabla u_0$  表示对原图像求梯度;  $S(|\nabla u_0|)$  表示原图像梯度值经高斯函数规定化后的梯度值;  $\frac{\nabla u_0}{|\nabla u_0|}$  用于保持图像的梯度方向与原图像相同。

通常情况下,红外图像的噪声较大,为了抑制噪声,本文引入了 TV 模型。由于有噪声图像的全变分要比无噪声图像的全变分明显大,本文采用最小化全变分用于抑制噪声,全变分模型如下:

$$\text{TV}[u(x, y)] = \min \iint_{\Omega} |\nabla u(x, y)| dx dy. \quad (9)$$

综合考虑图像纹理细节的增强和噪声的抑制效果,从规定化的梯度场中重建出增强图像  $u(x, y)$ ,即使如下的泛函最小:

$$E(u) = \chi \iint_{\Omega} |\nabla u| dx dy + \delta \iint_{\Omega} |\nabla u - \mathbf{G}|^2 dx dy, \quad (10)$$

其中:正参数  $\chi, \delta$  用于调节两部分的比重,为了减小由 TV 模型引起的阶梯效应<sup>[12]</sup>,  $\chi$  取值要比  $\delta$  小,本文取  $\chi=0.3, \delta=0.8$ 。以下称泛函模型式(10)为梯度直方图规定化-全变分(Gradient Histogram Specification-TV, GHS-TV)模型。

### 3 梯度直方图规定化-全变分求解

常见的求解泛函极值的方法主要有:变分法,遗传算法,最大值原理等。在图像处理应用中,变分法最为常用。根据变分法原理<sup>[13]</sup>,式(10)的 Euler-Lagrange 方程为:

$$\chi \nabla \cdot \left[ \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right] + 2\delta(\Delta u - \text{div} \mathbf{G}) = 0, \quad (11)$$

式中:  $\Delta$  为拉普拉斯算子,  $\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ ,  $\mathbf{G}$  为增强的梯度场。由于直接求解欧拉偏微分方程非常

困难,通常用梯度下降法进行迭代求解。梯度下降法的基本思想是:从初值函数  $u_0$  出发,沿着梯度方向的反方向,最终可到达  $E(u)$  的局部极小值点<sup>[14]</sup>。根据梯度下降法数值求解下述欧拉偏微分方程的初值问题,即可得到  $E(u)$  的极小值点。

$$\begin{cases} u_{(t=0)} = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} = - \left[ \chi \nabla \cdot \left[ \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right] + 2\delta(\Delta u - \text{div} \mathbf{G}) \right] \end{cases} \quad (12)$$

当泛函  $E(u)$  是凸函数时,算法总会迭代收敛到全局极值点。式(12)中  $t$  被称为时间行进参数,它描述了函数  $u$  的连续逼近过程,直至到达泛函  $E(u)$  的极小值函数,此时欧拉偏微分方程的演化速度消失:  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ 。

式(2)中存在许多微分算子,本文应用有限差分法对其进行离散迭代求解。拉普拉斯算子应用向前差分,散度应用向后差分,差分法的空间步长取为  $1^{[15-16]}$ 。

$$\nabla \cdot \left[ \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right] = \mathbf{N} = (N_x, N_y), \text{ 则}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{N} = N_x(i, j) - N_x(i-1, j) + N_y(i, j) - N_y(i, j-1). \quad (13)$$

拉普拉斯算子:

$$\Delta u = u(i+1, j) + u(i-1, j) + u(i, j+1) + u(i, j-1) - 4u(i, j). \quad (14)$$

散度:

$$\text{div} \mathbf{G} = G_x(i, j) - G_x(i-1, j) + G_y(i, j) - G_y(i, j-1). \quad (15)$$

结合公式(13)~(15)可得公式(12)的迭代过程如下:

$$\begin{aligned} u^{n+1}(i, j) = & u^n(i, j) - \Delta t \left[ \chi (N_x^n(i, j) - N_x^n(i-1, j) + N_y^n(i, j) - N_y^n(i, j-1)) + \right. \\ & 2\delta (u^n(i+1, j) + u^n(i-1, j) + u^n(i, j+1) + u^n(i, j-1) - 4u^n(i, j)) - \\ & \left. (G_x(i, j) - G_x(i-1, j) + G_y(i, j) - G_y(i, j-1)) \right]. \quad (16) \end{aligned}$$

### 4 实验结果与分析

由于式(10)中的泛函  $E(u)$  可能不是凸函数,故采用式(16)的迭代可能不收敛,因此,文中取输入图像  $u_0$  当作初始迭代值  $u^0$ ,这样迭代得到的最优结果图像  $u$  在直观上即为泛函的相关解。图 4 为本文算法(GHS-TV)增强图像的信息熵

$(En)^{[15]}$ 与迭代次数  $n$  的关系图。

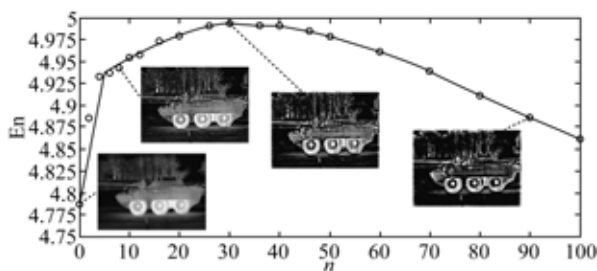


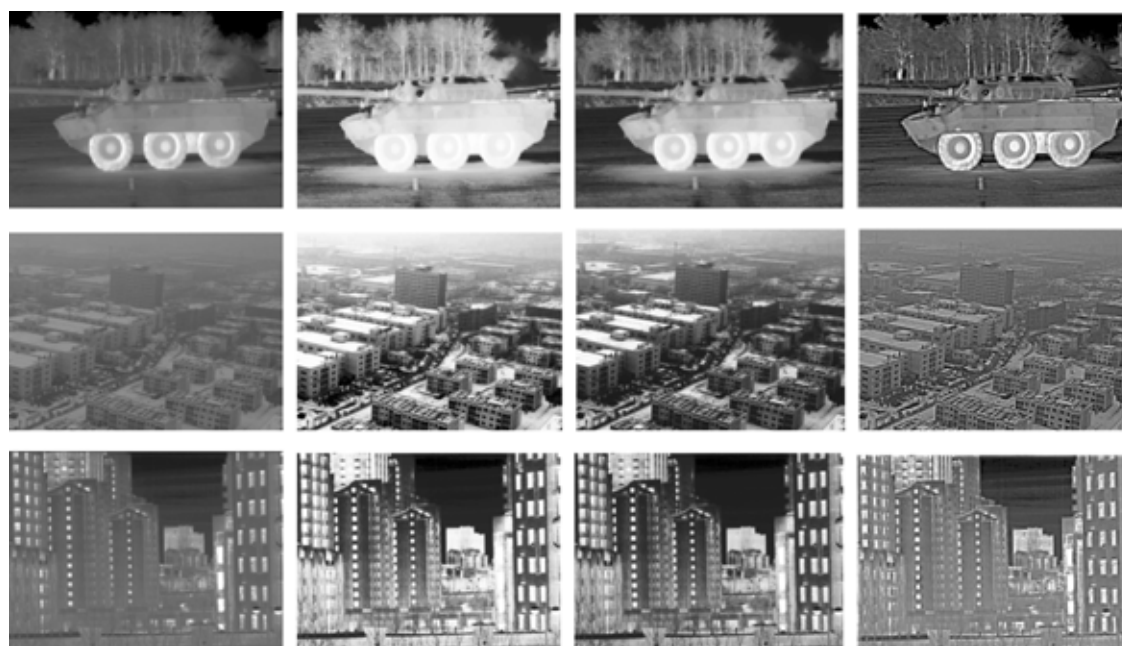
图 4  $En$ - $n$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $En$  and  $n$

从图 4 可以看出,随着迭代次数  $n$  的增加,信息熵先增大到 4.994,然后逐渐减小,这说明可以通过有限次数的迭代找到最佳的结果图像。理论

上,信息熵越大,图像的纹理细节越清楚,但从图 4 中最大的信息熵所对应的图像发现,信息熵最大时,图像的视觉效果并不是最好的,综合考虑算法的运算时间和图像的视觉效果,本文取迭代次数  $n=8$ 。

为了验证本文算法对图像纹理细节增强的效果,采用本文算法、直方图均衡化和直方图规范化<sup>[17]</sup>算法分别对红外图像做了大量实验,图 5 给出了其中的 3 组实验结果。另外,为了说明加入 TV 模型对图像噪声的抑制效果,选择两幅噪声较大的红外图像,分别用 GHS-TV 算法和去掉 TV 模型后的 GHS 算法进行处理,结果如图 6 所示。



(a)原红外图像

(b)直方图均衡化

(c)直方图规范化

(d)梯度直方图规范化-全变分

(a) Original infrared images (b) Histogram equalization (c) Histogram specification (d) GHS-TV

图 5 红外原图及不同增强算法的结果

Fig. 5 Original infrared images and their enhancement results by various algorithms

通过图 5 可以看出:直方图均衡化算法可以有效地调节图像的亮度,但是会出现过增强现象,从而导致图像过亮,一些细节模糊;直方图规范化算法没有出现过增强现象,对图像的动态范围也进行了有效拉伸,但图像的边缘纹理增强并不明显;而经过本文算法增强后,图像的目标边缘和微弱细节信息都得到了很好的保留,而且明显地增

强了,如图 5(d)中的车轮、远处的树林,楼房的边缘纹理等。

通过图 6 可以看出,对于含噪声较大的红外图像,如果不加 TV 模型,本文算法在增强图像纹理细节的同时,噪声也被放大了。而加入 TV 模型后,则在增强效果与抑制噪声上取折中,增强后图像的视觉效果更好了。

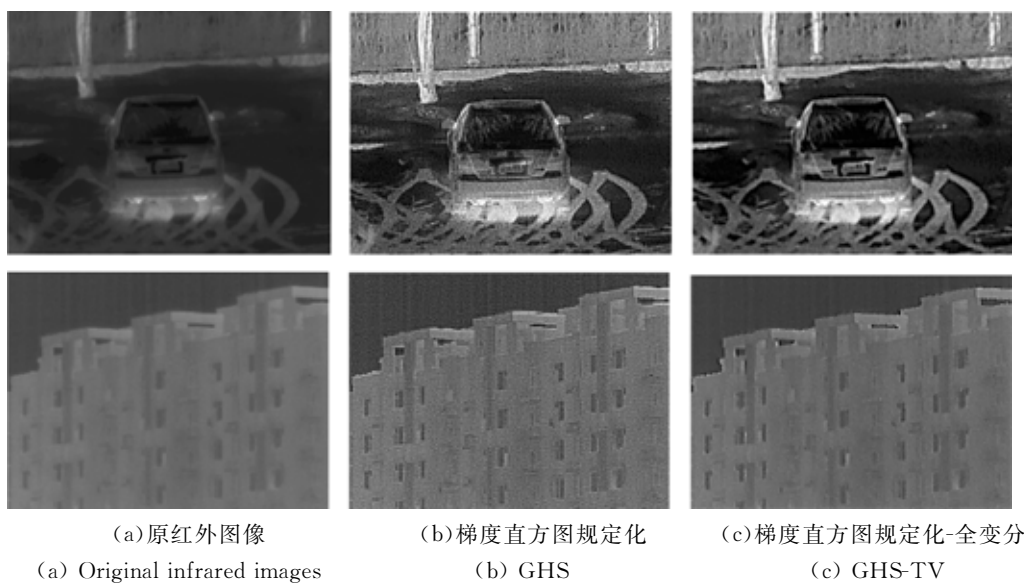


图 6 去掉 TV 模型前后的本文算法的结果

Fig. 6 Comparison results of proposed algorithms with/without TV

为了进一步说明本文算法的有效性,选择信息熵和峰值信噪比作为评价标准对图像做定量计算,结果如表 1、表 2 所示。

表 1 红外图像的  $En$  比较Tab. 1 Comparison of  $En$  for infrared images

	直方图 均衡化	直方图 规定化	本文算法
图 5(上)	4.576	4.530	4.943
图 5(中)	4.333	4.277	5.037
图 5(下)	4.439	4.251	5.036

表 2 红外图像的 PSNR 比较

Tab. 2 Comparison of PSNRs for infrared images

	本文算法去掉 TV 模型	本文算法
图 6(上)	13.222	17.538
图 6(下)	15.372	22.211

## 参考文献:

- [1] 程瑶,鲁进,孟丽娅. 红外图像传感器成像仿真系统设计[J]. 液晶与显示,2013,28(5):788-792.  
CHENG Y, LU J, MENG L Y. Design of imaging simulation system for infrared image sensor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013,28(5):788-792.

## 5 结 论

本文提出了增强红外图像微弱细节的方法。根据纹理细节模糊的红外图像的梯度直方图的特点,应用高斯函数对梯度直方图进行重新分布。另外,为了抑制噪声,在重建增强图像时,引入了 TV 模型。实验结果表明,本文提出算法的图像信息熵比灰度直方图均衡化和规定化算法有了显著提高,红外图像的目标边缘和细节增强效果明显。与去掉 TV 模型后的算法相比,峰值信噪比分别增大了 4.316、6.839,有效抑制了噪声。而且本文采用有限差分法对偏微分方程进行离散迭代求解和 Visual C++ 编程,在处理器是 2.0 GHz 的计算机上,处理大小为 480 pixel  $\times$  480 pixel 的图像,时间约为 40 ms,基本达到了工程应用的要求。

- [2] 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.  
SHI D, LI Q W, NI X, *et al.*. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2):342-346. (in Chinese)
- [3] UVAIS QIDWAI. Infrared image enhancement using H bounds for surveillance applications [J]. *IEEE*

- Transactions on Image Processing*, 2008, 17 (8): 1274-1282.
- [4] 贺柏根, 刘剑, 马天玮. 基于 DSP+FPGA 的实时图像云雾增强系统设计[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(6): 968-972.
- HE B G, LIU J, MA T W. Real-time image defogging and enhanced system designed based on DSP+FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 968-972.
- [5] 米曾真, 谢志江, 陈涛, 等. 重轨图像增强与边缘提取的关键技术[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1645-1652.
- MI Z ZH, XIE ZH J, CHEN T, *et al.*. Key technology of image enhancement and edge extraction for heavy rail [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1645-1652. (in Chinese)
- [6] MENOTTI D, NAJMAN L, FACON J, *et al.*. Multi-histogram equalization methods for contrast enhancement and brightness preserving [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53 (3): 1186-1194.
- [7] WANG Q, WARD R K. Fast image/video contrast enhancement based on weighted threshold histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 757-764.
- [8] IYAD J, HAO Y. A new method for image contrast enhancement based on automatic specification of local histograms [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2007, 7 (7): 1-10.
- [9] SOCOLINSKY D A. *A variational approach to image fusion* [D]. Baltimore: The Johns Hopkins University, 2000, 10-50.
- [10] WANG C, YE Z F. Brightness preserving histogram equalization with maximum entropy: a variational perspective [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51 (4): 1326-1334.
- [11] 费凤长, 方志军, 曾卫明, 等. 基于区间映射规则的数字直方图处理[J]. *计算机工程*, 2006, 32(19): 217-220.
- FEI CH F, FANG ZH J, ZENG W M, *et al.*. Histogram processing of digital image based on interval mapping law [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(19): 217-220. (in Chinese)
- [12] CHAN T F, ESEDOGLU S, PARK F E. A fourth order dual method for staircase reduction in texture extraction and image restoration problems [J]. *Technical Report, UCLA*, 2005.
- [13] 老大中. 变分法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007, 82-84.
- LAO D ZH. *Variational Method* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007, 82-84. (in Chinese)
- [14] 朱才志. 基于偏微分方程的数字图像处理的研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2007, 31-32.
- ZHU C ZH. *Research of digital image processing based on variational partial differential equation* [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2007, 31-32. (in Chinese).
- [15] 韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对对比度[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1382-1388.
- HAN X ZH, ZHAO J. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1382-1388. (in Chinese)
- [16] 韩希珍. 基于偏微分方程的图像增强方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2010, 22-23.
- HAN X ZH. *Research of image enhancement based on variational partial differential equation* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2010, 22-23. (in Chinese)
- [17] 肖斌, 王暄, 毕秀丽, 等. 一种基于高斯函数的直方图规定化算法[J]. *铁道学报*, 2006, 28(4): 119-122.
- XIAO B, WANG X, BI X L, *et al.*. A Histogram specification algorithm based on gaussian PDF [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 28(4): 119-122. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵文达(1987—),男,辽宁凌源人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事数字图像处理与嵌入式系统方面的研究。E-mail: 798915565@qq.com

#### 导师简介:



续志军(1953—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,主要从事电子信息技术和自动控制方面的研究。E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn