

双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强

赵文达^{1,2} 赵建¹ 赵凡^{1,2} 续志军¹

(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)

摘要 针对红外图像具有目标边缘和细节模糊的缺点, 提出一种双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强算法。该方法将图像变换到梯度域, 得到图像的梯度直方图, 构造出一个双峰高斯函数, 以此对梯度直方图的分布加以约束, 用变分方法对梯度场中增强的图像进行重建以提高图像的对比度和增强目标边缘和细节信息。为了防止噪声被放大, 在构造增强的梯度场时, 对噪声做了幅值切割。实验结果表明, 该算法无论是在视觉效果上还是在图像信息熵评估值定量指标上均明显优于直方图均衡化和规定化算法, 为红外图像提供了很好的视觉效果。

关键词 图像处理; 红外图像增强; 梯度场规定化; 变分法

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0309002

Variable Infrared Image Enhancement of Bimodal Gaussian Function Specification

Zhao Wenda^{1,2} Zhao Jian¹ Zhao Fan^{1,2} Xu Zhijun¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Infrared images typically have the problems of target fuzzy edges and details. The variable infrared image enhancement algorithm of bimodal Gaussian function specification is introduced. Firstly, by converting the image to the gradient domain, image gradient histogram can be obtained. Then, by constructing a bimodal Gaussian function, the distribution of the gradient histogram can be restricted. Finally, by using the variational method to reconstruct the image from the gradient field, the contrast and target edges and details of the image are improved. The cutting of the amplitude of noise in the transform of gradient field prevents the amplification of noise. Based on actual experimental results, both in visual effects and quantitative indicators of the assessed value of the image information entropy, the algorithm is significantly better than the histogram equalization and specification. Therefore, it gives a good visual effect for the infrared image.

Key words image processing; infrared image enhancement; gradient field specification; variational method

OCIS codes 100.2000; 100.2980

1 引言

由于红外成像技术的隐蔽性好, 具有能反映物体的热辐射、可夜视等优点, 在军事、科研和医疗等

领域中有广泛的应用。但由于红外探测器件光敏响应的不均匀性, 系统的非线性以及受外界环境的干扰, 使得红外图像具有噪声大、目标边缘模糊和纹

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61137001)

作者简介: 赵文达(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事数字图像处理与嵌入式系统等方面的研究。

E-mail: zwd212@sina.com

导师简介: 续志军(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子信息技术和自动控制等方面的研究。

E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: 25010)

理细节不清楚的缺点。因此,需要对红外图像进行增强,来为目标识别、跟踪提供高质量的图像信息^[1-5]。

直方图均衡化是一种常见的算法,它将图像的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,增强图像的对比度。然而,它容易使大小相近、数量少的灰度值合并,而将图像的微弱信息丢掉。许多改进的方法在一定程度上克服了均衡化的上述不足,如对直方图保持亮度不变^[6]的约束和加权限制^[7]等,但由于直方图均衡化是通过灰度值概率相加将灰度值进行重新映射,因此不能突出重要部分的灰度区间^[8]。规定化方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达到增强图像的目的。如果指导灰度值函数选择恰当,可以取得很好的增强效果^[9-10]。

图像的目标如果边缘突出,细节纹理明显,其梯度值就较大,所以对图像的梯度场进行增强,就可以使图像得到增强。文献[11]将图像的梯度场均衡化,增强了图像中微弱的细节信息,但均衡化方法容易将梯度场过增强,图像看起来很生硬。借鉴目前国内基于直方图增强算法的思路,本文提出基于双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强算法,将图像变换到梯度域,根据梯度平均值产生出两个高斯峰的均值,梯度对比度作为高斯峰的均方差,构造出一个双峰高斯函数,以此指导梯度直方图的分布,再用变分方法重建出增强的图像,使它的梯度场最接近于规定化的梯度场。双峰高斯函数指导梯度值的映射,可以有选择地对某梯度值的范围进行局部增强,增大小的梯度值,抑制大的梯度值,从而很好地增强了红外图像微弱的细节信息,提高图像的对比度。

2 梯度场双峰高斯函数规定化处理

2.1 梯度直方图规定化原理

对于一幅红外图像 $u(x, y) [(x, y) \subset \Omega = (0, N-1) \times (0, M-1)]$, 点 $p = (x, y) \subset \Omega$ 的梯度表示为

$$\nabla u_p = \left(\frac{\partial u_p}{\partial x}, \frac{\partial u_p}{\partial y} \right). \quad (1)$$

图像的每个像素点的梯度组成了梯度矢量场,梯度值代表灰度变化的速度,矢量的方向代表灰度朝哪个方向变化。对图像的每个梯度值,计算出具有该梯度值的像素总数,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。

梯度直方图规定化原理是利用事先确定的函数指导图像梯度值的映射,使梯度直方图成为规定的形状。对于梯度值范围为 $[0, l-1]$ 的图像,梯度直方图规定化计算过程为

$$s_k^T = T(r_k^T) = \sum_{i=0}^k p(r_i^T) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i^T}{n^T}, \quad (2)$$

$$v_k^T = G(z_k^T) = \sum_{i=0}^k g(z_i^T), \quad (3)$$

$$z_k^T = G^{-1}(s_k^T), \quad \{s_k^T - v_k^T\} \rightarrow 0, \quad (4)$$

式中: $0 \leq s_k^T \leq 1, k = 0, 1, \dots, l-1$; 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; $p(r_i^T)$ 表示梯度值概率密度; $T(r_k^T)$ 表示概率密度和; $G(z_k^T)$ 表示对 $g(z_i^T)$ 求和; $g(z_i^T)$ 表示一个事先确定的函数,指导梯度直方图重新分布成该函数的形状,增大梯度值来增强图像的纹理细节,本文中该函数为双峰高斯函数 $f(x, 2)$ (见 2.2 节)。梯度直方图规定化算法,首先按照(2)式计算出原梯度值 r_k^T 的变换梯度值 s_k^T ; 然后按照(3)式计算出规定梯度值 z_k^T 的变换梯度值 v_k^T ; 最后找到 $s_k^T \rightarrow v_k^T$ 的对应关系,按照(4)式计算出目标梯度值 z_k^T 。

2.2 梯度场双峰高斯函数规定化

双峰高斯函数定义为

$$f(x, 2) = \sum_{m=1}^2 A_m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right], \quad (5)$$

式中 $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \mu_2 > \mu_1, \sigma_2 < \sigma_1, A_1$ 和 A_2 是常数,如图 1 所示。

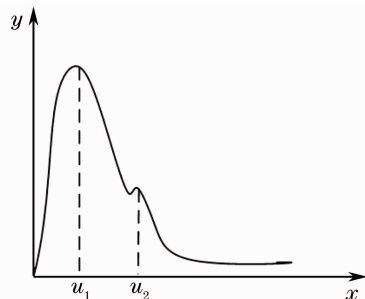


图 1 双峰高斯函数图

Fig. 1 Bimodal Gaussian functions graph

从图 1 可以看出, μ_1 和 μ_2 调整两个高斯峰的位置, σ_1 和 σ_2 决定两峰的平缓程度,其值越大,峰形越平缓。仿照文献[17]对灰度域内高斯函数的期望和方差的计算方法,梯度域内双峰高斯曲线的数学期望 μ_1, μ_2 和方差 σ_1, σ_2 为

$$\mu_1 = \sum_{r^T=0}^{l-1} r^T p(r^T), \mu_2 = \alpha \mu_1, \quad (6)$$

$$\sigma_1 = 1 / \left[\sum_{r^T=0}^{l-1} (r^T - \mu_1)^2 p(r^T) \right]^{1/2}, \sigma_2 = \beta \sigma_1, \quad (7)$$

式中 $p(r^T)$ 为原图像梯度值 r^T 的概率密度, α 和 β 为参数。对大量的纹理细节不清楚的红外图像研究发现, 它们的梯度直方图形状是一个窄的单峰, 并且峰值靠近梯度值为零的方向。如果将它的峰型变得平缓, 梯度值就会向值大的方向延伸, 图像的纹理细节就会越清楚。红外图像的梯度值小, 以梯度平均值作为 μ_1 , 可以自适应地将第一个高斯峰落在小梯度值范围; 通过参数 α 的调节, 第二个高斯峰可以落在目标梯度值范围内。从而不仅有选择地对小梯度值范围进行局部对比度增强, 还能对目标梯度值进行增强, 可以到达增强红外图像的整体对比度和微弱细节信息的目的。红外图像的梯度直方图越窄, 梯

度值的均方差 $\left[\sum_{r^T=0}^{l-1} (r^T - \mu_1)^2 p(r^T) \right]^{1/2}$ 就越小, 对应的(7)式中的 σ_1 就越大, 则峰型被调整得越平缓, 从而使梯度均值(峰值附近)左边的梯度值向梯度值为 0 的方向扩展, 均值右边的梯度值向梯度值增大的方向扩展。对于对比度小、细节模糊的红外原图像, 其梯度直方图中均值左边的梯度值原本就很小且数量少, 图像目标细节的增强主要取决于均值右边的梯度值, 随着均值右边的梯度值的增大, 目标细节增强的越明显, 图像的视觉效果就会得到改善; σ_2 用来调节第二个峰形的平缓程度。有了 $f(x, 2)$, 就可以用它指导梯度值的映射, 完成梯度直方图的规定化处理^[12]。

考虑到红外图像噪声大的特点以及保持图像梯度的方向不变, 增强的梯度场为

$$\mathbf{W} = \begin{cases} S(|\nabla u_0|) \cdot \frac{\nabla u_0}{|\nabla u_0|}, & |\nabla u_0| \geq \epsilon \\ 0, & |\nabla u_0| < \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

式中 ϵ 为噪声门限值, 当梯度值小于 ϵ 时, 认为是噪声。 \mathbf{W} 为增强的梯度场, u_0 为原红外图像, $|\nabla u_0|$ 为原红外图像的梯度值, $S(|\nabla u_0|)$ 是原图像梯度值经双峰高斯函数规定化后的梯度值, $\frac{\nabla u_0}{|\nabla u_0|}$ 表示梯度的方向。

3 重建增强的图像

在得到双峰高斯函数规定化的梯度场后, 通过最小二乘原理得到目标函数

$$E(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u - \mathbf{W}| dx dy, \quad (9)$$

式中 u 表示增强的图像, \mathbf{W} 表示增强后的图像梯度场。泛函式(9)式的 Euler-Lagrange 方程为

$$\Delta u = \text{div}(\mathbf{W}), \quad (10)$$

式中 Δ 是拉普拉斯算子, $\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$, \mathbf{W} 为增强的梯度场。由于欧拉偏微分方程的直接求解非常困难, 通常用梯度下降法迭代求解。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^[13]。实际上, (10)式可视为(9)式的泛函式 $E(u)$ 的梯度, 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:

$$\begin{cases} u_{(t=0)} = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -[\Delta u - \text{div}(\mathbf{W})] \end{cases} \quad (11)$$

当泛函式 $E(u)$ 是凸函数时, 算法总可迭代收敛到全局极值点。(11)式中的参数 t 称为时间行进参数, 它描述了函数 u 的连续逼近过程, 直至到达泛函式 $E(u)$ 的极小值函数, 此时欧拉偏微分方程的演化速度消失: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ 。写成时间离散迭代形式有

$$u^{n+1} = u^n - \Delta t [\Delta u^n - \text{div}(\mathbf{W})], \quad (12)$$

采用文献[14]提出的方法对泛函式的动态范围进行约束, 迭代形式如下:

$$\begin{cases} u_{\text{temp}} = u^n - \Delta t [\Delta u^n - \text{div}(\mathbf{W})] \\ u^{n+1} = \max\{0, \min(255, u_{\text{temp}})\} \end{cases}, \quad (13)$$

由此计算的结果在 $[0, 255]$ 范围内, 计算机能够直接显示。

(13)式中存在许多微分算子, 本文采用有限差分法对其离散迭代求解, 有限差分法的空间步长取为 1^[15]。由于迭代的过程中, 像素的位移会造成图像质量的降低, 所以拉普拉斯算子用向前差分, 散度算子用向后差分, 图像的边界采用对称延拓的方法^[16], 这样避免了像素的位移, 保证了图像的视觉质量。

上述重建图像的流程如图 2 所示。

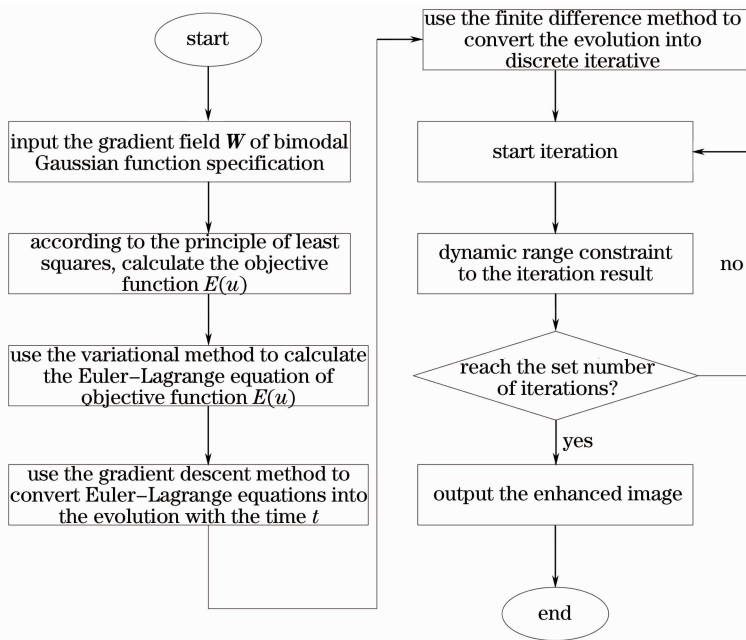


图 2 重建图像的算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart of image reconstruction

4 实验与结果分析

在双峰高斯函数的构造中,参数 μ_1 、 μ_2 、 σ_1 和 β 的选取尤为重要,它们决定高斯峰的形状,与图像的增强效果直接相关。在实时显示中,首个高斯峰将决定规范化后梯度直方图的总体形状,其参数 μ_1 和 σ_1 可以根据输入图像的梯度平均值和梯度对比度的倒

数自动确定。为了防止峰形过于平缓导致增强的图像过于锐化,取 $\beta = 1$,即 $\sigma_2 = \sigma_1$ 。 μ_2 决定第二个峰的位置,其大小由参数 α 确定, $\alpha \geq 1$,当 $\alpha = 1$ 时,高斯函数为单峰。本文给出了 α 取不同值时,本文算法对图像增强的效果图,如图 3 所示,原图见图 4(a)。

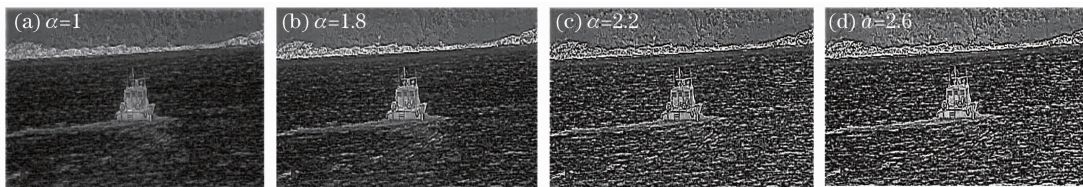


图 3 α 取不同值时的增强图像

Fig. 3 Enhanced images with different values of α

从图 3 可以看出,随着 α 的增大,图像的纹理细节越来越清楚。当 $\alpha = 1$ 时,高斯函数只有一个峰,图像的纹理细节已经被增强了,但不是很清楚。当 $\alpha = 2.2$ 时,图像的纹理细节十分明显,但整幅图像看起来过于锐化,比较生硬。而 $\alpha = 1.8$ 时,图像的视觉效果最好,纹理细节也很清楚。所以,本文取 $\alpha = 1.8$ 。另外, A_1 和 A_2 决定峰值的大小,为了总体上保持原梯度直方图的单峰形状, A_2 的值应该比 A_1 小,本文取 $A_1 = 1, A_2 = 0.2$ 。

利用本文提出的双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强算法与直方图均衡化和直方图规定化^[17]算法对红外图像做了大量实验,选择其中的

轮船和货车两幅红外图像进行说明。取噪声门限值 $\epsilon = 3$,时间间隔 $\Delta t = 1$,迭代次数 $n = 8$ 。图 4 和图 5 给出了两幅图像的实验结果以及原图像的梯度直方图(横轴代表梯度值,纵轴代表图像的像素数量)和规范化后的直方图。

通过实验对比可以看出:图 4(a)原图像总体上比较暗,目标(船)的边缘和纹理细节不清楚。经直方图均衡化处理后,图像对比度得到了提高,但是产生了过增强,目标内部的纹理细节信息变得模糊。直方图规定化算法处理的图像有了改进,目标边缘得到锐化的同时没有产生过增强,但纹理细节仍然不清楚。本文算法[图 4(d)]实现了图像总体对比度

的增大,目标边缘和内部纹理细节增强明显(船上的窗户和轮胎)。图 5(a)原图像背景比较暗,目标(货车)比较亮,背景里的微弱细节不清楚。与直方图均

衡化和规定化算法相比,本文算法[图 5(d)]对目标的边缘纹理和背景里的微弱细节(树枝和栅栏等)增强得都很好。从梯度直方图(本文梯度的离散形式为

$$r^T = \sqrt{[u(x+1,y) - u(x,y)]^2 + [u(x,y+1) - u(x,y)]^2}, \quad 0 \leq r^T \leq 360. \quad (14)$$

可以看出,规定化后的梯度直方图形状和双峰高斯函数的形状相似(由于第二个高斯函数峰值比第一个小很多且距离近,所以在直方图中表现的不

明显),对原图的背景和目标的梯度范围进行了增强,达到了增强红外图像微弱细节信息和提高对比度的目的。

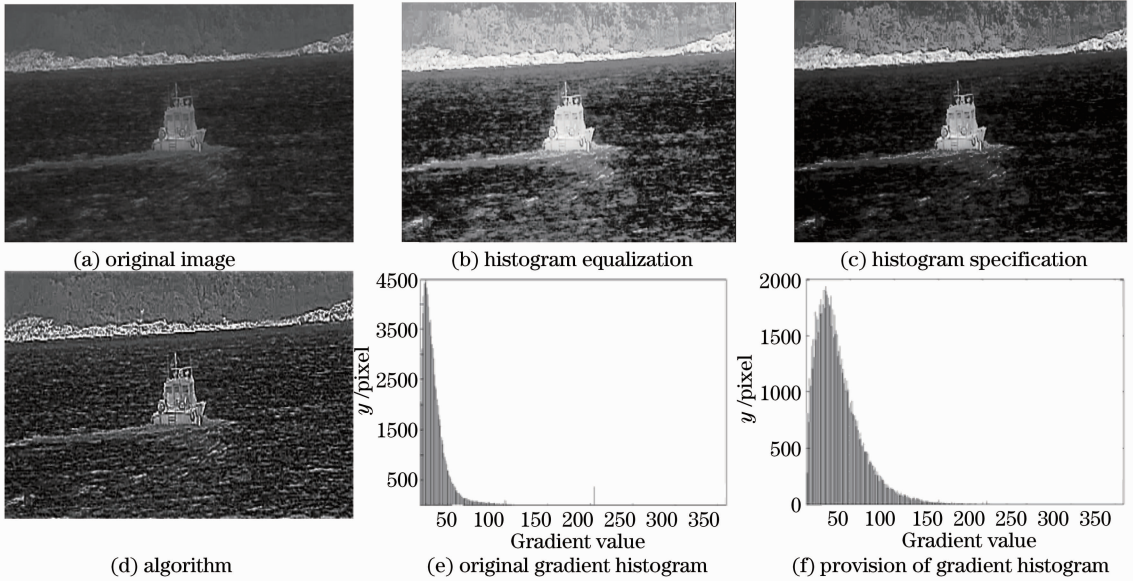


图 4 轮船红外原图及其经过各种增强算法后的对比

Fig. 4 Original infrared images and the comparison after kinds of enhancement algorithms

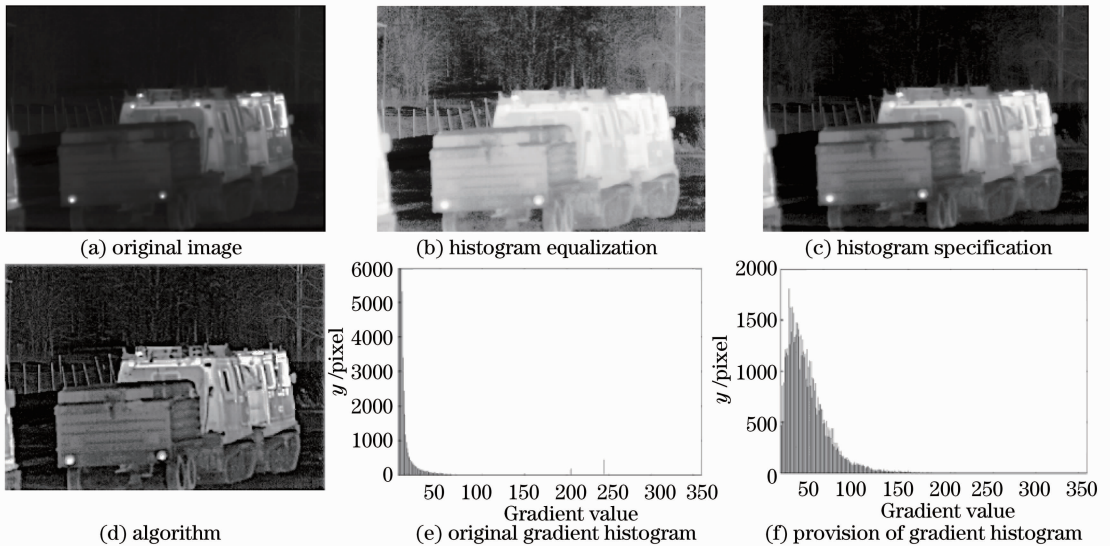


图 5 货车红外原图及其经过各种增强算法后的对比

Fig. 5 Original infrared images and the comparison after kinds of enhancement algorithms

为了进一步说明本文算法的有效性,选择信息熵 E_{En} 对图像做定量计算。信息熵的表达式为

$$E_{En} = - \sum_{i=0}^{l-1} p(i) \text{lb} p(i), \quad (15)$$

式中 $p(i)$ 表示图像中出现的像素灰度值为 i 的概率。图像的 E_{En} 越大, 表明图像的对比度越大, 图像的目标边缘和纹理细节越清楚。上面两组图像的信息熵值如表 1 所示。

表 1 红外图像的 E_{En}

Table 1 E_{En} of the infrared image enhancement

	Histogram equalization	Histogram specification	Algorithm
Fig. 4	4.759	4.212	5.170
Fig. 5	4.166	3.751	4.309

5 结 论

通过对直方图均衡化和规定化算法的分析, 提出了双峰值高斯函数规定化的变分红外图像增强算法。该算法将图像变换到梯度域, 得到图像的梯度直方图; 利用双峰高斯函数对此梯度直方图的分布进行指导; 用变分方法重建增强的图像。通过对噪声的幅值切割, 完成了对噪声的处理。实验结果表明, 本文算法的图像信息熵比直方图均衡化和规定化算法有了显著提高, 增强了红外图像的微弱细节信息, 并提高了对比度。而且本文采用有限差分法将偏微分方程离散化, 减小了计算量和运行时间, 对于大小为 $480 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的图像的处理时间为 38 ms , 基本达到了工程应用对图像处理的要求。

参 考 文 献

- Cheng Gong, Guo Lei, Han Junwei, *et al.*. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1015001.
程 焱, 郭 雷, 韩军伟, 等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1015001.
- Wu Yiquan, Ji Shouxin, Zhan Bichao. Infrared dim target detection based on nonsubsampling contourlet transform and independent component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0510002.
吴一全, 纪守新, 占必超. 基于无下采样轮廓波变换和独立分量分析的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0510002.
- Wang Weihua, Li Zhijun, He Yan, *et al.*. A real-time target detection algorithm for infrared search and track system based on region of interest extraction [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1109001.
王卫华, 李志军, 何 艳, 等. 一种基于兴趣区提取的红外搜索系统目标实时检测算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1109001.
- Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1011001.
万 明, 张凤鸣, 胡 双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标

- 检测算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1011001.
- Huang Kang, Mao Xia, Liang Xiaogeng. Background clutter quantification method for infrared image of small targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0310001.
黄 康, 毛 峡, 梁晓庚. 红外小目标图像的背景杂波量化方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0310001.
- 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.
- Wang Q, Ward R K. Fast image/video contrast enhancement based on weighted thresholded histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 757–764.
- Hu Zhengping, Liu Bo. Dynamic partition image enhancement algorithm induced by optimal adaptive histogram specification function [J]. *Journal of Yanshan University*, 2009, 33(6): 471–477.
胡正平, 刘 博. 基于自适应直方图规定化函数引导的动态分层图像增强算法[J]. *燕山大学学报*, 2009, 33(6): 471–477.
- Sun C C, Ruan S J, Shie M C, *et al.*. Dynamic contrast enhancement based on histogram specification [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1300–1305.
- 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.
- Zhu Lixin, Wang Ping'an, Xia Deshen. Image contrast enhancement by gradient field equalization [J]. *J Computeraided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(12): 1546–1552.
朱立新, 王平安, 夏德深. 基于梯度场均衡化的图像对比度增强 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(12): 1546–1552.
- Fei Fengchang, Fang Zhijun, Zeng Weiming *et al.*. Histogram processing of digital image based on interval mapping law [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(19): 217–220.
费风长, 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.
- Zhu Caizhi. Research of Digital Image Processing Based on Variational Partial Differential Equation [D]. *Anhui: University of Science and Technology of China*, 2007. 31–32.
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.
- D A Soeolinsky. Dynamic range constraints in image fusion and visualization [C]. *Proc Signal and Image Processing, IASTED*, 2000.
- Han Xizhen, Zhao Jian. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1382–1388.
韩希珍, 赵 建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1382–1388.
- Wang Chao, Ye Zhongfu. Based on variational partial differential equation of infrared image enhancement [J]. *Infrared & Millimeter Waves*, 2006, 25(4): 306–310.
王 超, 叶中付. 红外图像的变分增强算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(4): 306–310.
- Xiao Bin, Wang Xuan, Bi Xiuli, *et al.*. A histogram specification algorithm based on Gaussian PDF [J]. *J China Railway Society*, 2006, 28(4): 119–122.
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.

栏目编辑: 何卓铭