

文章编号 1004-924X(2014)01-0146-06

基于自适应梯度阈值各向异性滤波抑制红外复杂背景

孙海江^{*}, 王延杰, 陈小林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:在传统各向异性扩散滤波算法的基础上,提出了一种自适应梯度阈值各向异性滤波算法,用于有效地抑制红外复杂背景、滤除噪声,同时增强红外弱小目标。该算法根据图像的局部特性,利用其在不同方向上的梯度特点,判断某点像素是噪声还是图像以及其存在于图像的平滑区域还是边缘区域。文中据此提出了自适应求取边缘函数中的梯度阈值(K 值)的方法,解决了原各向异性滤波算法的边缘函数中 K 值固定单一的问题。实验证明:与原各向异性滤波算法和其他背景抑制算法相比,提出的算法增加了去噪功能,对各种复杂背景抑制效果更好,增强后的图像信噪比提高了近 2 倍。

关键词:背景抑制;目标增强;自适应梯度阈值;各向异性滤波

中图分类号:TP391.4; 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142201.0146

Suppression of infrared complex background based on adaptive gradient threshold anisotropic filtering

SUN Hai-jiang^{*}, WANG Yan-jie, CHEN Xiao-lin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: sunhaijiang@126.com

Abstract: On the basis of traditional anisotropic diffusion filtering algorithm, an adaptive gradient threshold based anisotropic filtering algorithm is proposed to suppress the infrared complex background, filter out the noise effectively and enhance the infrared dim target. According to the local features of a image and its gradient features in different directions, the algorithm can determine the point of a pixel to be a noise or an image, and can point out the point of the pixel to be in the smooth region or the edge region. Based on above, it proposes a method to calculate the gradient threshold (K value) of the edge function adaptively and to solve the shortcoming that the K value is fixed and single in the edge function of the traditionall anisotropic filtering algorithm. This experiment shows that this algorithm increases the denoising function, suppresses complex background effectively, and enhances Signal to Noise Ratio(SNR) of the image by 2 times as compared with that of the original anisotropic filtering algorithm and other background suppression algorithms.

Key words: background suppression; target enhancement; adaptive gradient threshold; anisotropic filtering

收稿日期:2013-01-12;修订日期:2013-02-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61172111)

1 引言

红外复杂背景抑制与弱小目标增强技术是实现远距离对弱小红外目标自动捕获和跟踪的一项关键技术^[1-4]。克服各种各样的红外复杂背景(连绵的山脉、起伏的云朵、复杂的障碍物等);对识别红外弱小目标(几何尺寸小,缺乏形状和纹理等)的影响以及消除红外传感器本身内部机体噪声所带来的干扰,是成功实现红外弱小目标捕获与跟踪的关键。目前常用的方法包括:基于灰度形态学的方法、二维最小均方误差方法(TDLMS)。张必银^[5]和曹琦^[6]分别研究了基于偏微分理论的各向异性扩散滤波算法实现了背景的抑制和增强。本文在各向异性扩散滤波算法的基础上,提出了基于梯度特性的自适应计算边缘函数中 K 值的方法,相比原各向异性滤波算法和其他背景抑制算法,该方法增加了去噪功能,并对各种复杂背景抑制效果更好,增强后的目标与背景的信噪比更高。

2 各向异性滤波算法

2.1 各向异性微分方程

偏微分方程思想在图像处理技术中的应用起源于 Gabor 和 Jain 的工作研究中^[7]。然而, Koenderink 和 Witkin 的研究成果^[8-9]在图像处理领域里才取得了真正的实质性进展。Perona 和 Malik^[10]在 1990 年提出了一种各向异性扩散过程(P-M 过程),这种基于各向异性微分的方法对图像边缘提取,抑制图像平稳区域取得了很好的效果。

Perona 和 Malik 提出的扩散 PDE^[10-11](P-M 方程)如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(i,j,t)}{\partial t} = \text{div}[g(|\nabla I|)\nabla I] \\ I(i,j,0) = I_0(i,j) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: I 为图像的灰度值, ∇I 为梯度, div 为散度算子, $g(\cdot)$ 为边缘函数;

边缘函数 $g(\cdot)$ 具有特定的选取原则:在平滑区域,其值应较大;而在边缘等梯度变化较大的区域值则较小,从而可以保留图像的局部特性。常用的边缘函数^[6,10-11]如下:

$$g(r) = \frac{1}{1 + (r/K)^2}, \quad (2)$$

$$g(r) = \exp(-|r|/K)^2, \quad (3)$$

式中: K 为控制边缘函数下降速率的常数,一般取 10 和 20 等大于 0 的常数。

因此,张必银和曹琦分别利用各向异性微分方程设计出红外弱小运动目标实时检测的规整化滤波算法和红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法,两种算法都以各向异性滤波技术为基础。

2.2 各向异性滤波的实现

根据文献^[5-6]的介绍,图像 I 的滤波结果等价于原始图像 I 与局部自适应算子 H' 的卷积。设 $I(i,j)$ 为图像点 (i,j) 的灰度值,将该点图像在 4 个方向上的梯度带入边缘函数获得 4 个方向的计算结果以及结果之和分别为: $\lambda_E = g(|I_{i,j+1} - I_{i,j}|)$ 、 $\lambda_W = g(|I_{i,j-1} - I_{i,j}|)$ 、 $\lambda_S = g(|I_{i+1,j} - I_{i,j}|)$ 、 $\lambda_N = g(|I_{i-1,j} - I_{i,j}|)$ 和 $\lambda_\Sigma = \lambda_E + \lambda_W + \lambda_S + \lambda_N$ 。

自适应算子 H' 如下:

$$\mathbf{H}(i,j) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_N & 0 \\ -\lambda_W & \lambda_\Sigma & -\lambda_E \\ 0 & -\lambda_S & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

滤波结果 $\hat{I}(i,j)$ 计算公式如下:

$$\hat{I}(i,j) = \mathbf{H}(i,j) \cdot \begin{bmatrix} 0 & I_{i-1,j} & 0 \\ I_{i,j-1} & I_{i,j} & I_{i,j+1} \\ 0 & I_{i+1,j} & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

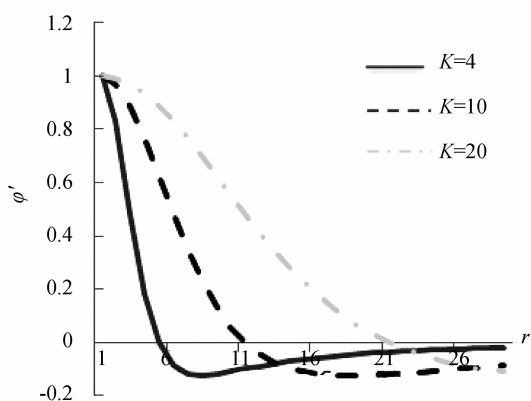
式中: \cdot 代表点乘,表示两个矩阵内各元素乘积之和。

3 自适应 K 值(梯度阈值)求取方法

3.1 K 值的作用

在查阅到的文献中,边缘函数中 K 的取值都是人为定义的固定数,简单的取大于零的常数,并且在整幅图像的处理中过于单一,不随图像的区域特性进行变化,即使对图像的一部分平滑效果较好,对另一部却效果欠佳。因此,对 K 值的选取是具有实际意义的,这里先分析一下 K 值对扩散过程的影响。

P-M 方程的扩散行为是由影响函数^[11] $\varphi(r) = rg(r)$ 的斜率 φ' 决定的,将公式(2)形式的边缘函数代入 $\varphi(r)$,分别取 K 值为 4、10 和 20,画出

图 1 K 取不同值时 φ' 的曲线图Fig. 1 A graph of φ' for different values of K

φ' 的曲线如图 1 所示,当 K 值越小时影响函数的下降速度越快,与横轴交汇时的 r 值越小。而 φ' 的取值符合公式(6)。

$$\begin{cases} \varphi' \geq 0, 0 \leq r \leq K \\ \varphi' < 0, r > K \end{cases} \quad (6)$$

可见在图像的平坦区域 $|\nabla I| < K$ 时,P-M 方程起正向扩散作用,而在边缘附近,梯度很大以至于 $|\nabla I| > K$,则起反向扩散作用,而反向扩散作用使边缘锐化,从而导致背景抑制后的图像在边缘处不够平滑,尤其在噪声区域更为明显。本文根据 K 值起到的阈值特点,将 K 值称为梯度阈值。

3.2 自适应 K 值算法

为了克服在边缘区域和噪声区域的反向扩散作用,本文提出了一种自适应求取 K 值的方法。该方法根据局部的图像特性,自适应计算求取 K 值,在整幅图像的处理中,随处理区域的不同采用不同的 K 值,尤其是边缘和噪声区域,背景抑制得更好,提高了整幅图像的背景抑制效果。下面具体介绍一下本文提出的自适应 K 值(梯度阈值)求取方法。

红外复杂背景下的红外弱小目标图像的特点^[5-6]分析在很多文献中都有描述,基本是由三部分信息组成:背景图像、噪声图像和目标图像。背景图像包括大面积缓慢变化不规则的云层和山川等,这种图像背景信息,都具有很强的相关性,并占据了整个红外场景图像的低频部分;噪声图像主要是对目标提取造成影响的孤立的点噪声,一般是红外相机的坏点,在空间域中表现为和弱小

目标类似的高频特征,但在空间分布上是随机的;目标图像:红外弱小目标一般为几何尺寸较小的小亮斑,有的甚至只有 3×3 个像元。根据以上特点,以 3×3 十字型窗口区域为例,判断窗口中心点像素的梯度特性,分析该点属于图像的哪个区域。

如图 2 所示,4 种分布情况的中心像素都属于背景区域,图 2(a)的特点是中心点像素的灰度值与 4 个方向上的像素灰度值一致,图 2(b)到图 2(d)是中心点像素的灰度值最多与 3 个方向上的像素灰度值相比较要小。

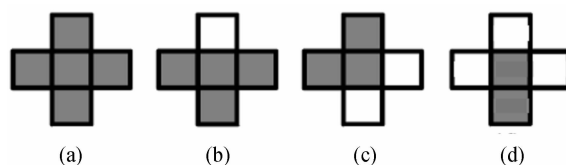


图 2 中心点像素为背景的 4 种分布情况

Fig. 2 Four distribution for center point of the pixel as a background

中心像素为噪声图像区域的特点是 4 个方向的像素灰度值都与噪声差别很大,分布示意图如图 3 所示。

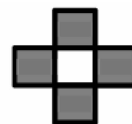


图 3 中心点像素为噪声的分布情况

Fig. 3 Distribution for center point of the pixel as noise

红外弱小目标的图像像素灰度值的特点是要比背景略高一些。中心像素为目标的 4 种分布情况,如图 4 所示。其中图(a)为目标的目标中心区域,而图(b)到图(d)则为目标边缘的 3 种情况。

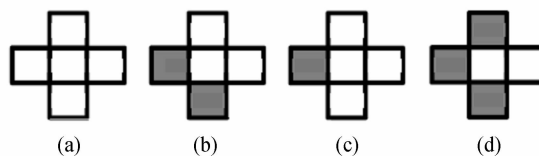


图 4 中心像素为目标四种分布情况

Fig. 4 Four distributions for center point of the pixel as target

设图像的中心点像素在图像中的位置为 (i, j) ,该点像素的灰度值为 $I_{i,j}$;左右上下 4 个方向

上的临近点的像素灰度值分别为 $I_{i-1,j}, I_{i+1,j}, I_{i,j-1}$ 和 $I_{i,j+1}$ 设点 (i,j) 在 4 个方向上的梯度模值与中心点灰度值的比值之和再向上取整为 $\sum \nabla_{i,j} I$, 即我们设计的特征参数, 如公式(7)所示。

$$\sum \nabla_{i,j} I = \lceil \frac{|I_{i,j+1} - I_{i,j}|}{I_{i,j}} + \frac{|I_{i,j} - I_{i,j-1}|}{I_{i,j}} + \frac{|I_{i,j} - I_{i,j-1}|}{I_{i,j}} + \frac{|I_{i,j} - I_{i-1,j}|}{I_{i,j}} \rceil. \quad (7)$$

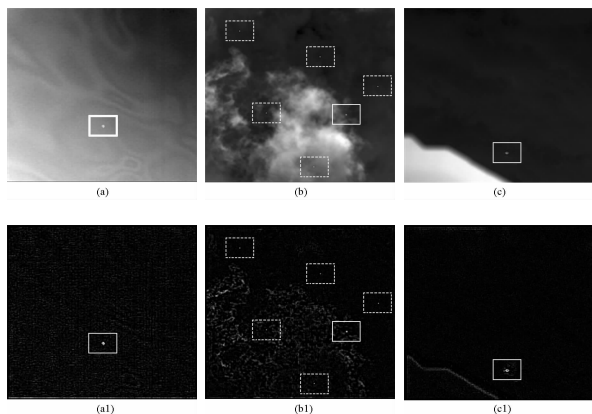
根据上面介绍的图像特性, 一般在图像背景的平滑区域都不大于 1, 如图 2(a)所示, 或者是目标自身的中心点, 如图 4(a)所示; 而当中心点为

$$K = \begin{cases} \min(|I_E|, |I_W|, |I_S|, |I_N|) & 2 \leq \sum \nabla_{i,j} I \leq 3 \\ \max(|I_E|, |I_W|, |I_S|, |I_N|) & \sum \nabla_{i,j} I \leq 1, \sum \nabla_{i,j} I > 3 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $|I_E| = |I_{i+1,j} - I_{i,j}|, |I_W| = |I_{i-1,j} - I_{i,j}|, |I_S| = |I_{i,j+1} - I_{i,j}|, |I_N| = |I_{i,j-1} - I_{i,j}|$ 。

4 实验结果

为了验证算法的有效性, 针对 3 幅典型的红外复杂背景弱小目标图像进行滤波处理。其中图 5(a)为红外相机机体不均匀性造成的非均匀背景和红外弱小目标图像; 图 5(b)为天空云层背景下的红外弱小目标图像, 并且存在一些相机坏点造成的噪声; 图 5(c)为较亮面积的遮挡物背景下的红外弱小目标图像。分别采用基于灰度形态学的方法(处理结果如图 5(a1-c1)所示)、最小二维均方误差的方法(处理结果如图 5(a2-c2)所示)、各向异性滤波算法(处理结果如图 5(a3-c3)所示)和本文方法(处理结果如图 5(a4-c4)所示)。其中, 虚线框为噪声, 实线框为目标。



噪声时, 根据噪声图像的 3×3 区域灰度分布情况可知道其 $\sum \nabla_{i,j} I$ 值大于 3, 如图 3 所示, 或是图 4 中(d)的中心点不是目标而且噪声时; 以上两种 $\sum \nabla_{i,j} I$ 的取值情况都表明是需要平滑的区域, 而剩下的其它情况则表明图像特性属于弱小目标的边缘区域, 而此时 $\sum \nabla_{i,j} I$ 取值则介于 2 和 3 之间, 都需要增强。因此根据 $\sum \nabla_{i,j} I$ 的计算特点, 获得 K 值的自适应计算公式如(8)所示, 在弱小目标区域需要起反向扩散作用, 因此 K 取梯度在四个方向上的较小值, 而在平滑区域和噪声区域则应起正向扩散作用, 因此取梯度在四个方向上的最大值。

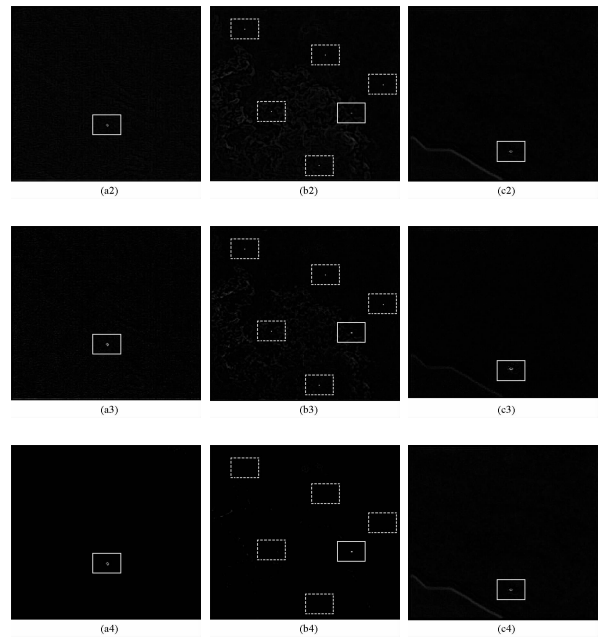
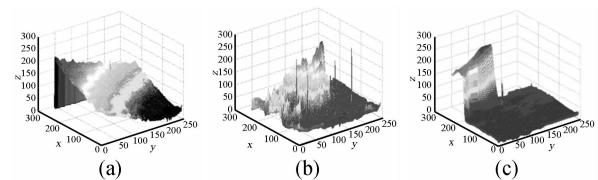


图 5 3 幅典型的红外图像及滤波处理结果

Fig. 5 Three typical infrared images and their filtering process results

下面是 3 幅红外原始图像及四种滤波处理后的图像在三维空间上的灰度信息图, 如图 6 所示, 它们分别对应图 6 中的各幅图像。



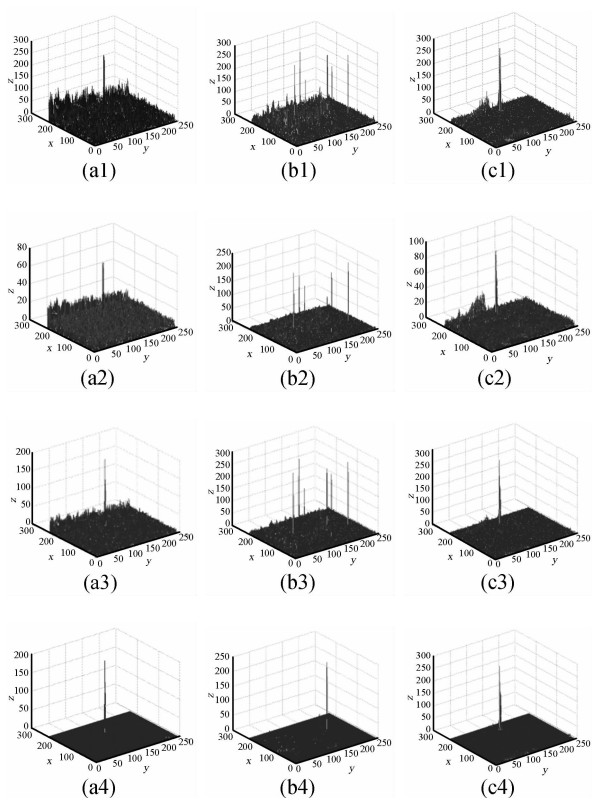


图 6 灰度信息三维对比图

Fig. 6 Three-dimensional comparison chart of gray information

从上面的对比效果来看,本文方法的图像背景杂波的抑制效果最好,不仅准确地滤除了噪声,而且增强后的红外弱小目标图像背景更纯净,目标更明显,有效地提高了红外弱小目标的提取能力。但是本文算法在设计上是以 3×3 大小目标模板为基础,因此,针对尺度较大的目标,会出现目标中间区域被当成背景被抑制掉的现象,如图 5 中的 a(4) 和 c(4),但是,并不影响背景抑制后的弱小目标的提取能力。

为了量化说明本文算法的有效性,通过 2 个背景抑制评价函数加以评判^[5],分别采用背景抑制因子 BSF 和信噪比增益 g_{SNR} ,前者用来衡量算法对背景结构的去除能力,定义为:

$$\text{BSF} = \sigma_{\text{in}} / \sigma_{\text{out}} \quad (9)$$

式中: σ_{in} 为输入图像的标准差, σ_{out} 为输出图像的标准差。

后者用来衡量算法保留目标的能力,定义为:

$$g_{\text{SNR}} = R_{\text{SN}}^{\text{out}} / R_{\text{SN}}^{\text{in}} \quad (10)$$

式中: $R_{\text{SN}} = (g_t - g_b) / \sigma$, g_t 为目标区域均值, g_b 为背景均值, σ 为背景的标准差, $R_{\text{SN}}^{\text{in}}$ 为原始图像

的信噪比, $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$ 为处理后的图像信噪比。对上面实验的四种滤波算法进行评价函数的统计,四种滤波算法分别对图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c) 3 幅红外原始图像处理后的背景抑制因子 BSF 的结果如表 1 所示;三幅原始图像的输入图像信噪比和 4 种滤波方法处理后的输出图像信噪比如表 2 所示;4 种滤波方法处理后的输出图像信噪比与原始输入图像的信噪比之比,即信噪比增益如表 3 所示。

表 1 图 5(a-c) 3 幅图像经不同滤波算法处理后的背景抑制因子

Tab. 1 Background suppression factor of three images in Fig. 5 (a-c) processed by different filtering algorithms

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)
灰度形态学方法	5.759	4.934	10.981
最小二维均方误差法	15.475	10.393	21.499
各向异性滤波算法	13.507	10.341	20.565
本文方法	34.984	29.293	27.218

表 2 原始图像的输入信噪比 $R_{\text{SN}}^{\text{in}}$ 和不同滤波算法处理后的信噪比 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$ Tab. 2 Input $R_{\text{SN}}^{\text{in}}$ of original image and $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$ processed by different filtering algorithms

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)
原始图像的 $R_{\text{SN}}^{\text{in}}$	1.744	3.067	3.038
灰度形态学方法的 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$	22.459	21.646	40.967
最小二维均方误差法的 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$	17.524	21.853	34.480
各向异性滤波算法的 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$	53.436	45.570	77.174
本文方法的 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$	139.888	131.415	102.677

表 3 不同滤波算法处理后的信噪比增益

Tab. 3 Signal-to-noise ratio gain processed by different filtering algorithms

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)
基于灰度形态学方法	12.877	7.057	13.480
最小二维均方误差法	10.047	7.124	11.346
各向异性滤波算法	30.638	14.99	25.395
本文方法	80.206	42.845	33.787

评价结果表明,本文的方法处理后的图像,背景抑制因子 BSF 是 3 种算法中最高的,而且处理后的图像信噪比 $R_{\text{SN}}^{\text{out}}$ 也最大,相比于原始图像的信噪比增益 g_{SNR} 也最大,说明采用本文方法抑制

背景增强目标的效果,较其它 3 种方法都要好,尤其说明增加了自适应梯度阈值的计算方法后,大大提高了原各向异性滤波算法的效果。

5 结 论

本文介绍了自适应梯度阈值各向异性滤波算法。该算法根据图像的局部特性,利用其在不同方向上的梯度特点,判断该点像素是噪声还是图

像,并判断其存在于图像的平滑区域还是边缘区域,给出了边缘函数中 K 值(梯度阈值)的自适应计算方法,解决了原各向异性滤波算法在边缘函数中 K 值固定单一的缺点。实验证明:相比原各向异性滤波算法和其他背景抑制算法,该算法增加了去噪功能,并对各种复杂背景抑制效果更好,增强后的目标与背景的信噪比更高。算法的实现可以大大提高红外复杂背景下弱小目标的红外预警能力和目标搜索、检测能力。

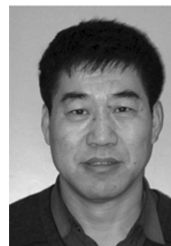
参考文献:

- [1] 秦翰林. 红外监视告警系统中的复杂背景抑制算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
QIN H L. *Study on complex background suppression algorithm for infrared surveillance warning system* [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [2] 孟祥龙,张伟. 天基红外图像的点目标检测[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2094-2100.
MENG X L, ZHANG W. Detection of point targets in space-based infrared images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2094-2100. (in Chinese)
- [3] 秦翰林,周慧鑫. 采用多尺度隐式马尔可夫模型的红外图像背景抑制[J]. 光学精密工程,2011,19(8):1950-1956.
QIN H L, ZHOU H X. Suppression of infrared image background by multiscale hidden Markov model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1950-1956. (in Chinese)
- [4] 刘兴森,王仕成,赵静. 结合统计分布和非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测[J]. 光学精密工程,2011,19(4):908-915.
LIU X M, WANG SH CH, ZHAO J. Infrared small target detection based on nonsubsampling Contourlet transform and statistical distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 908-915. (in Chinese)
- [5] 张必银,张天序,桑农,等. 红外弱小运动目标实时检测的规整化滤波方法 [J]. 红外与毫米波学报,2008,27(2):95-100.
ZHANG B Y, ZHANG T X, SANG N, *et al.*. Novel regularizing filtering method for real-time detecting IR DM small moving target [J]. *J. Infrared Millin. Waves*, 2008, 27(2): 95-100. (in Chinese)
- [6] 曹琦,毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法 [J]. 光学学报,2009,29(9):2408-2412.
CAO Q, BI D Y. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection [J]. *Acta Optical Sinica*. 2009, 29(9): 2408-2412. (in Chinese)
- [7] GABOR D. Information theory in electron microscopy [J]. *Laboratory Investigation*, 1965, 14: 801-807.
- [8] KOENDERINK J. The structure of images [J]. *Biological Cybernetics*, 1984, 50(5): 363-370.
- [9] WITKIN A. Scale-space filtering [J]. *Int. Joint Conf. On AI, Karlsruhe*, 1984, 9: 1019-1022.
- [10] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639.
- [11] 王大凯,侯榆青,彭进业. 图像处理的偏微分方程方法 [M]. 北京:科学出版社,2008.
WANG D K, HOU Y Q, PENG J Y. *Partial Differential Equation of Image Processing Methods* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



孙海江(1980—),男,吉林辉南人,博士,助理研究员,2012年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事目标识别与跟踪技术及高清视频图像增强显示方面的研究。E-mail: sunhaijiang@126.com



王延杰(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年于吉林大学获得学士学位,1998年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事数字图像实时处理技术的研究。E-mail: wyj-ciomp@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)