

文章编号: 0253-2239(2010)10-2806-06

基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测

吴一全^{1,2} 尹丹艳¹

(¹ 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016
² 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 提出了一种基于模糊最小二乘支持向量机(FLS-SVM)进行背景预测、利用模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵实现阈值分割的红外弱小目标检测方法。首先采用 FLS-SVM 对训练样本进行学习得到回归函数,并以此预测红外图像中的背景;然后将原始图像与预测图像相减得到残差图像,并提出基于模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵的阈值选取算法分割残差图像,将小目标和噪声从残差背景中分割出来;最后利用目标灰度的平稳性和运动轨迹的连续性进一步检测出真实的小目标。给出了实验结果及分析,并与基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)以及基于最小二乘的背景预测方法的检测结果进行了比较。结果表明,该方法具有更高的检测概率和信噪比增益,优于上述基于背景预测的红外弱小目标检测方法。

关键词 图像处理;红外弱小目标检测;模糊支持向量机;残差图像;模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2806

Detection of Small Target in Infrared Image Based on Background Predication by FLS-SVM

Wu Yiquan^{1,2} Yin Danyan¹

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

Abstract A detection method of small target in infrared image is proposed, which is based on the background predication by fuzzy least squares support vector machine (FLS-SVM) and threshold segmentation by fuzzy Tsallis-Havrda-Charvat entropy. Firstly, the fitting function is obtained from the training samples by using FLS-SVM and the background in infrared image is predicted. Then, the predicted image subtracted from the source image gives the residual-error image. The residual-error image is segmented by the proposed threshold selection method based on fuzzy Tsallis-Havrda-Charvat entropy so as to separate small target and noise from the residual background. Finally, the true small target is further detected based on the stability of the target gray and the consistency of target trajectory. The experimental results are given and analyzed. They are compared with the detection results of the background predication methods based on LS-SVM or least squares. The results show that the proposed method has higher detection probability and the gain of signal-to-noise ratio (GSNR) and it is superior to the above-mentioned methods.

Key words image processing; small infrared target detection; fuzzy support vector machine; residual-error image; fuzzy Tsallis-Havrda-Charvat entropy

1 引言

红外成像技术因具有完全被动、利于隐蔽、远距

离探测和昼夜工作等特点,而应用于精确制导、目标探测及火控等领域^[1~5]。随着各种红外隐身技术的

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-07-31

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: 吴一全(1963—),男,博士,教授,主要从事方向为图像处理与识别、信号处理等方面的研究。

E-mail: gumption_s@yahoo.com.cn

运用和探测距离的加大,目标的红外辐射强度、辐射面积和对探测系统所成张角相应大幅度减小,即使目标本身很大,在成像平面内也仅表现为少量像素(大小约为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel} \sim 6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 之间),即“红外小目标”。其面积较小,缺乏有效的形状特征,且常湮没在复杂的自然背景中,信噪比较低。如何有效地抑制自然背景的影响,是提高弱小目标检测准确性和可靠性的关键问题。通过分析红外图像中自然背景空间灰度分布的相关性和连续性,人们研究了基于背景预测的红外弱小目标检测方法。这些方法通过将原始图像与背景预测图像相减达到背景抑制的目的,即从原始红外小目标图像中减去所预测的背景,从而抑制背景、增强目标。目前国内外采用的预测方法包括数字滤波^[6~10]、最小均方与最小二乘^[11,12]、最小一乘^[13]和神经网络^[14,15]等。常用的数字滤波方法包括均值滤波(MF)、中值滤波(MedF)、Wiener 滤波(WF)及其改进方法。它们对特定的噪声抑制效果较好,而实际图像中的噪声往往是多种噪声的混合,使得数字滤波方法具有一定的局限性。最小均方与最小二乘法对异常点敏感,当信号的信噪比较低时,最小二乘估计的线性预测系数会有很大的变化,稳健性较弱。神经网络方法存在隐层单元神经元数目难以确定、易陷入局部最优等缺陷。近年发展起来的支持向量机^[16~18]通过非线性变换将输入空间中的非线性可分数据集变换到高维空间使其线性可分,并在该空间中求取最优线性分类面。最优分类面仅依赖于训练集中少量的点(称之为支持向量),对噪声敏感。解决这个问题的一种方法是对训练集进行预处理,去除噪声,但因缺乏噪声的足够信息,实际操作难度较大。

鉴于上述分析,本文提出了一种基于模糊最小二乘支持向量机(FLS-SVM)背景预测的红外弱小目标检测方法。该方法主要包括三个步骤,进行实验给出了实验结果及分析,并与现有的一些基于背景预测的红外弱小目标检测方法进行了比较。

2 基于 FLS-SVM 的背景预测

2.1 用于背景预测的 LS-SVM

对于一个给定的训练数据集 $(\mathbf{x}_i, y_i), i=1, \dots, N$, 其中 y_i 是某一像素点的灰度值, \mathbf{x}_i 是该像素点邻域灰度值组成的向量, N 为样本总数。用非线性映射 $\phi(\cdot)$ 将样本从原空间映射到 K 维特征空间

中,在此特征空间中构造如下最优线性回归函数

$$f(\mathbf{x}_i) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}_i) + l, \quad (1)$$

式中 \mathbf{w} 为权向量, l 为固定值。于是非线性拟合问题便转化为高维特征空间中的线性拟合问题了。根据结构风险最小化原则,综合考虑函数复杂度和拟合误差,回归问题可以表示为约束优化问题

$$\min[J(\mathbf{w}, \mathbf{e})] = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2, \quad (2a)$$

$$y_i = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}_i) + l + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2b)$$

式中 C 为正则化参数, e_i 为拟合误差。为求解上述优化问题,需把有约束优化变成无约束优化,为此建立拉格朗日(Lagrange)函数

$$L = J(\mathbf{w}, \mathbf{e}) - \sum_{i=1}^N \alpha_i [\mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}_i) + l + e_i - y_i], \quad (3)$$

式中 α_i 是 Lagrange 乘子。根据 Karush-Kuhn-Tucher(KKT)最优条件,消去 e_i 和 \mathbf{w} 后,得到如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{e}^T \\ \mathbf{e} & \mathbf{G}\mathbf{G}^T + \frac{\mathbf{I}}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$, $\mathbf{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N)^T$, \mathbf{I} 为 $N \times N$ 单位矩阵, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T$, $\mathbf{G} = [\phi(\mathbf{x}_1)^T, \phi(\mathbf{x}_2)^T, \dots, \phi(\mathbf{x}_N)^T]$ 。由(3)式可知,LS-SVM 优化问题可转化为解线性方程组,并且可得到如下回归模型:

$$y = \sum_{i=1}^N \alpha_i g(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + l, \quad (5)$$

式中 $g(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ 为满足 Mercer 条件的核函数。本文中选取的核函数为

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|^2}{\sigma^2}\right). \quad (6)$$

2.2 引入模糊隶属度优化核函数

由于支持向量机的训练结果对噪声点非常敏感,为了减小噪声的影响,引入了模糊隶属度。由(6)式可知,核函数 $g(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 其实是与 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 之间距离有关的一个值,而且 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 之间的距离越大,核函数值就越小直至趋近于 0,当 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 为同一向量时,核函数值达到最大 1。也可以说核函数反映的是向量 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 的相似程度。据此定义如下模糊隶属度

$$\nu(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \begin{cases} 0, & 0 \leq g < a \\ 2[(g-a)/(b-a)]^2, & a \leq g < (a+b)/2 \\ 1-2[(g-b)/(b-a)]^2, & (a+b)/2 < g \leq b \\ 1, & b < g \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 g 为核函数 $g(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 的值, a, b 可以调节隶属度曲线的窗宽, $0 < a < b < 1$, 其值根据试验结果的优劣选定, 具体方法如下: 挑选几组 a, b 的值, 分别试验得到结果; 再根据结果的优劣, 对 a, b 值进行调整; 重复几次, 即可得到合适的 a, b 值。由此给出优化的核函数如下:

$$g(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2}{\sigma^2}\right) - \frac{\nu(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)}{s}, \quad (8)$$

式中 s 用于调节隶属度幅值, 目的是保持 g 矩阵的正定性。 $s > 1$, 其具体取值方法与 a, b 的选定类似, 也由实验得到。

实验结果证明使用优化后的核函数得到的预测

结果更好。

3 基于模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵的阈值分割

用原始图像减去经(5)式得到的预测图像即为残差图像。下面提出一种基于模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵的阈值选取算法对残差图像进行分割, 将疑似目标从背景中提取出来。

首先定义模糊隶属度函数 $\mu(k)$, 其曲线如图 1 所示, 它表示灰度值为 k 的像素属于目标的隶属度值:

$$\mu(k) = \begin{cases} 0, & L_{\min} \leq k < a' \\ 2[(k-a')/(b'-a')]^2, & a' \leq k < (a'+b')/2 \\ 1-2[(k-b')/(b'-a')]^2, & (a'+b')/2 < k \leq b' \\ 1, & b' < k \leq L_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中 k 为某一灰度值, L_{\max}, L_{\min} 分别为图像中的最大和最小灰度值, 经试验选取 $a' = L_{\max}/9, b' = 8 \times L_{\max}/9$ 。

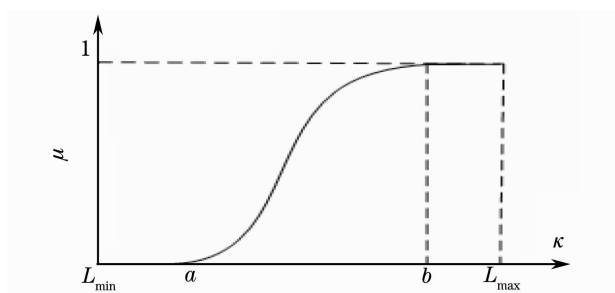


图 1 隶属度函数

Fig. 1 Membership function

疑似目标和背景的模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵分别为

$$H_O(T) = \frac{1}{\alpha-1} \left\{ 1 - \frac{h_O(T)}{[P_O(T)]^\alpha} \right\}, \quad (10)$$

$$H_B(T) = \frac{1}{\alpha-1} \left\{ 1 - \frac{[h - h_O(T)]}{[1 - P_O(T)]^\alpha} \right\}, \quad (11)$$

式中 T 为灰度级阈值, $h = \sum_{k=L_{\min}}^{L_{\max}} [p(k)\mu(k)]^\alpha$ 为直方图总熵, $P_O(T)$ 和 $h_O(T)$ 分别为疑似目标的模糊概率和模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵

$$P_O(T) = \sum_{k=T+1}^{L_{\max}} p(k)\mu(k), \quad (12)$$

$$h_O(T) = \sum_{k=T+1}^{L_{\max}} [p(k)\mu(k)]^\alpha, \quad (13)$$

式中 $p(k)$ 为灰度值为 k 的像素的概率, $p(k)\mu(k)$ 表示灰度值为 k 且隶属于目标的像素的概率。

阈值选取的准则函数为

$$\phi(T) = H_O(T) + H_B(T) + (1-\alpha)H_O(T)H_B(T). \quad (14)$$

$\phi(T)$ 取最大值时所对应的 T 值即为最佳阈值 T^* 。

由于残差图像中的小目标与抑制了灰度起伏后的背景之间面积相差悬殊, 灰度值却相差不大。抑制了灰度起伏后的背景像素灰度值集中在 L_{\min} 附近, 只有少量疑似目标点和残留背景边缘的像素灰度值稍大些(如图 3 和图 4 所示)。一般的图像阈值分割算法会将部分背景误划分为目标。提出的模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵阈值分割算法, 引入模糊隶属函数, 可以较好地克服这个缺点。由图 1 看出, 它可以很好地降低灰度在 L_{\min} 附近的像素对分割的影响。因此提出的基于模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵的阈值选取算法能够更准确地分割出小目标。

4 基于目标灰度的平稳性和运动轨迹的连续性检测红外小目标

用阈值 T^* 分割残差图像得到的分割图像中,疑似目标点包含了真实目标点和噪声点两类。对噪声点可以根据小目标的运动特性,采用多帧红外图像序列分析进行剔除。因为在图像序列中,噪声点随机出现,而真实目标点具有灰度平稳性和运动轨迹连续性,其特点为:1) 帧间运动距离基本相等;2) 帧间运动方向基本一致;3) 帧间灰度变化不显著。

在进行多帧处理时,假设相邻帧为 f_1, f_2 和 f_3 ,疑似目标点在 f_1, f_2 和 f_3 中的坐标分别为 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ 和 $p_3(x_3, y_3)$,将这三点通过映射转换到同一图像坐标系中,得到矢量 op_1, op_2 和 op_3 及其两个矢量差 v_1 和 v_2 ,即 $v_1 = op_2 - op_1, v_2 = op_3 - op_2$ 。特点 1) 和 2) 体现为目标点对应的两个矢量差 v_1 和 v_2 相似;特点 3) 则表现为目标点有相似的灰度值。由此设计疑似目标点帧间相似度量

$$\gamma = \|v_1 - v_2\| \sigma_0, \quad (15)$$

式中 σ_0 为疑似目标点在连续三帧中的灰度标准差。

如果 $\gamma \leq D$,则判断为目标点,予以保留;否则即视为噪声点,将其去除,其中 D 为设定的门限值,通常为一较小常数。经过上述处理,即可检测出真正的红外小目标。

5 实验结果与分析

为验证本文方法的优越性,将提出的方法与基于 LS-SVM 背景预测的方法以及基于最小二乘背景预测方法的检测结果进行了比较。检测概率 f_p 定义如下:

$$f_p = f_s / f_t, \quad (16)$$

式中 f_s 为检测出小目标的图像帧数, f_t 为实验图像总帧数。

采用了两组红外小目标图像序列进行实验,共 80 frame 图像,实验环境是 Intel(R) Pentium(R) processor 1600 MHZ/512 MB 内存/Matlab 6.5。基于 FLS-SVM 背景预测的小目标检测方法正确检测 75 frame,检测概率为 93.75%,另外有 5 frame 也可以检测出目标,但有少量虚警点;基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)背景预测的小目标检测方法正确检测 72 frame,检测概率为 90%,另外的 8 frame 也可检测出目标但虚警率较高;基于最小二乘背景预测的小目标检测方法正确检测 57 frame,检测概率为 71.25%,另外的 23 frame 中 17 frame 无法检测出目标,6 frame 虚警率较高。

实验采用的两组红外图像序列都是标准的云层背景,特点是信噪比较低,目标掩盖在云层中较难检测。下面给出这两组图像的实验结果。图 2 分别为两组图像序列中第 9 帧和第 8 帧的实验结果,其中图 2(a)为原始图像;图 2(b)为本文方法所得残差图像阈值分割的结果;图 2(c)为 LS-SVM 方法所得残差图像阈值分割的结果;图 2(d)为最小二乘方法所得残差图像阈值分割的结果。图 3 和图 4 分别是针对两组图像采用上述方法所得残差图像的直方图。图 5 为两组图像序列中第 6 帧到第 12 帧检测结果的叠加,可以看出目标的一小段运动轨迹,由此验证了目标检测的准确性(如果检测到的不是目标,则不存在连续的运动轨迹)。

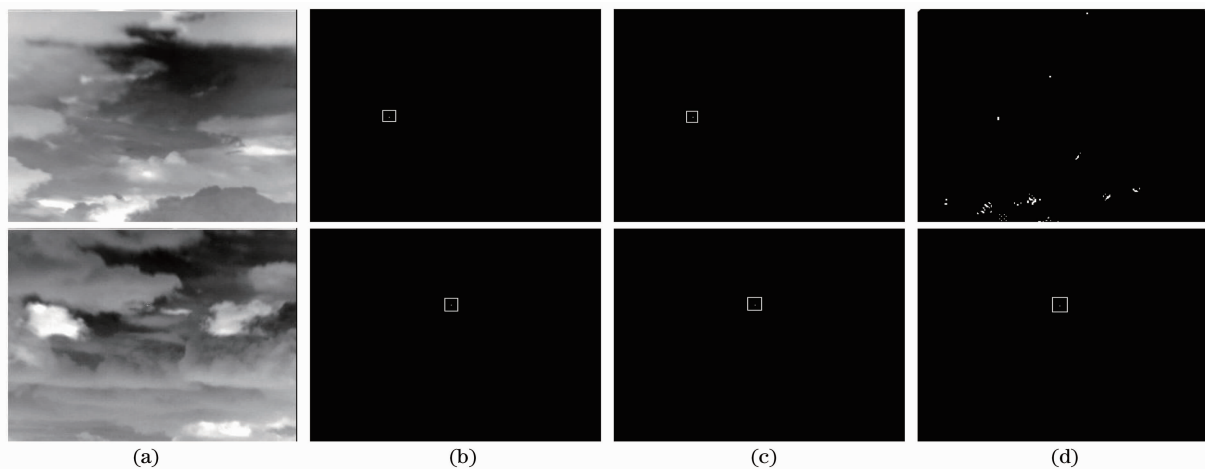


图 2 两组图像序列中第 9 帧和第 8 帧的实验结果。(a) 原始图像;(b) 本文方法阈值分割结果;

(c) LS-SVM 方法阈值分割结果;(d) 最小二乘方法阈值分割结果

Fig. 2 Experimental results of the 9th and 8th frames in two image sequences. (a) original images; (b) segmented images by this paper method; (c) segmented images by LS-SVM method; (d) segmented images by least square method

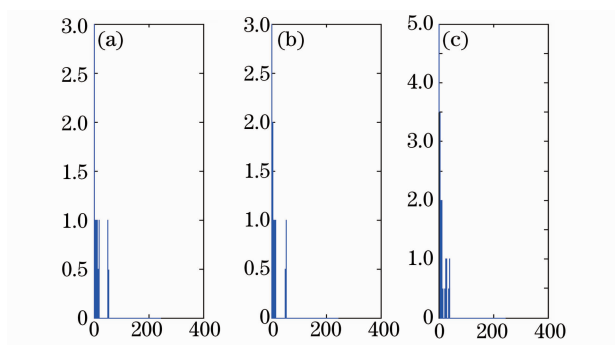


图 3 图像序列 1(第 9 帧)残差图像的直方图。(a)FIS-SVM 残差直方图;(b)LS-SVM 残差直方图;(c)最小二乘残差直方图

Fig. 3 Histograms of residual error images of image sequence 1. (a) histogram of the residual error image obtained by FIS-SVM; (b) histogram of the residual error image obtained by LS-SVM; (c) histogram of the residual error image obtained by least squares

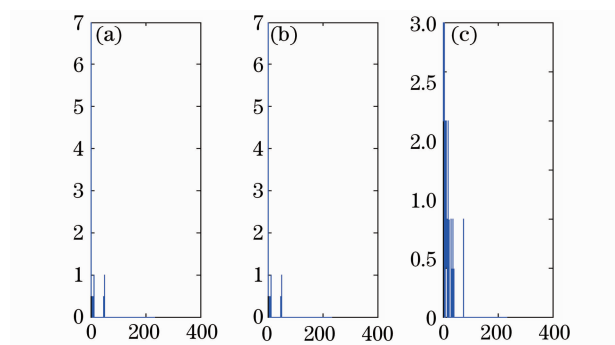


图 4 图像序列 2(第 8 帧)残差图像的直方图。(a)FIS-SVM 残差直方图;(b)LS-SVM 残差直方图;(c)最小二乘残差直方图

Fig. 4 Histograms of residual error images for image sequence 2. (a) histogram of the residual error image obtained by FIS-SVM; (b) histogram of the residual error image obtained by LS-SVM; (c) histogram of the residual error image obtained by least squares

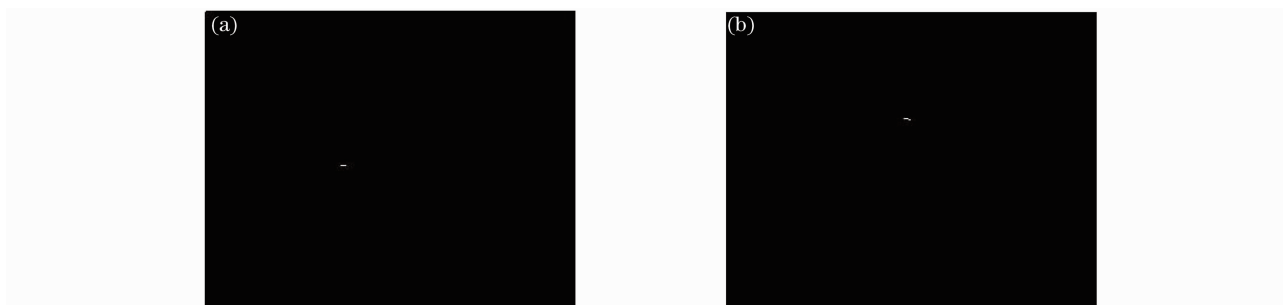


图 5 两组图像序列中第 6 帧到第 12 帧检测结果的叠加

Fig. 5 Superimposed trajectory of the detection results from the 6th to 12th frames in two image sequences

进一步采用信噪比和信噪比增益对上述诸方法的处理性能进行定量评价。信噪比和信噪比增益定义如下:

信噪比

$$S = (G_t - G_b) / \sigma_b, \quad (17)$$

式中 G_t 表示目标的灰度均值, G_b 表示背景灰度均值, σ_b 表示背景标准差。信噪比增益为

$$G_s = S_0 / S_1, \quad (18)$$

式中 S_0 为处理后输出图像的信噪比, S_1 为原输入图像的信噪比。当 S_1 为负值的情况下, 采用替代统计公式

$$G_s = (S_0 + |S_1|) / |S_1|. \quad (19)$$

上述三种方法的输出信噪比及信噪比增益数据列于表 1 中。本文求取输入图像信噪比的具体实现方法如下:

1) 在输入图像中找到目标位置, 并求得目标的

灰度均值;

2) 求取目标以外的背景灰度均值;

3) 计算背景灰度的标准差;

4) 按照(17)式求得输入图像的信噪比 S_1 。

同理, 计算残差图像的信噪比得到 S_0 数据。

对实验结果的分析 and 比较如下

1) 由检测概率和图 3, 图 4 可以明显地看出: 基于 FLS-SVM 的背景预测方法较基于最小二乘的背景预测方法更易提取出小目标。因为最小二乘法对异常点敏感, 鲁棒性较弱, 当图像的信噪比较低时, 最小二乘估计的线性预测系数会有很大的变化。所以当后面的图像信噪比较低时, 就检测不出目标了。而 FLS-SVM 的方法全面考虑了在回归和预测中可能出现的问题, 方法更加严密;

2) 从表 1 中可以看出, 本文方法的性能优于其他两种方法, 小目标的检测能力提高。

表 1 三种方法的性能对比

Table 1 Performance comparison of three methods

Experimental image	Method	S_1	S_0	G_s
The 9th frame of image sequence 1	Proposed method	1.0488	171.1614	163.1974
	LS-SVM	1.0488	136.9527	129.6720
	Least squares	1.0488	75.2263	71.7261
The 8th frame of image sequence 2	Proposed method	1.2362	94.7679	76.6607
	LS-SVM	1.2362	86.0653	69.6209
	Least squares	1.2362	84.9873	68.7488

6 结 论

提出了一种基于 FLS-SVM 进行背景预测、利用模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵实现阈值分割的红外弱小目标检测方法。分析了红外弱小目标图像的特征,采用 FLS-SVM 对背景进行预测,并用原始图像减去预测图像得到残差图像,由此大大降低了背景起伏的影响;提出基于模糊 Tsallis-Havrda-Charvat 熵的阈值选取算法对残差图像进行分割行之有效;基于目标灰度的平稳性和轨迹的连续性可准确地检测出真实的红外小目标。实验结果表明,与基于 LS-SVM 以及基于最小二乘的背景预测方法的检测结果相比,提出的方法具有更高的检测概率和信噪比增益,优于基于背景预测的红外小目标检测方法。

参 考 文 献

- Cao Qi, Bi Duyan. Characteristic-selecting filtering in infrared small target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2408~2412
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
- Li Xin, Zhao Yigong, Chen Bing. A new approach of small and dim target detection in cloud cluster infrared image based on classification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3036~3042
李欣, 赵亦工, 陈冰. 基于分类的红外云层背景弱小目标检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3036~3042
- Bai Xiangzhi, Zhou Fugen. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. *Pattern Recogn.*, 2010, **43**(6): 2145~2156
- Li Hong, Wei Yantao, Li Luoqing *et al.*. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2010, **53**(2): 77~83
- Zhang Tianxu, Li Meng, Zuo Zhengrong *et al.*. Moving dim point target detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering[J]. *Pattern Recogn. Lett.*, 2007, **28**(2): 246~253
- Zhu Jimbiao, Li Jianxun. Novel matching filter design and its application on dim point target detection in infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2128~2133
朱金标, 李建勋. 匹配滤波器优化设计及在红外弱小点目标检测中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2128~2133
- Ling Jianguo, Liu Erqi, Yang Jie *et al.*. Approach of infrared small target motion prediction and tracking based on H_∞ filter[J]. *J. Infrared Millim. W.*, 2005, **24**(5): 366~369
凌建国, 刘尔琦, 杨杰等. 基于 H_∞ 滤波器的红外弱小目标运动预测和跟踪方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(5): 366~369
- Hu Moufa, Shen Yan, Chen Zengping. New adaptive background suppression algorithm via M-filter[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(1): 104~107
- 胡谋法, 沈燕, 陈曾平. M滤波的自适应背景抑制算法[J]. *光子 • 激光*, 2007, **18**(1): 104~107
- Zhang Biyin, Zhang Tianxu, Zhang Kun *et al.*. Adaptive rectification filter for detecting small IR targets[J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2007, **22**(8): 20~26
- Li Fan, Liu Shangqian, Hong Ming *et al.*. Dim infrared targets detection based on background prediction [J]. *J. Xidian University*, 2009, **36**(6): 1075~1078
李凡, 刘上乾, 洪鸣等. 基于背景预测的红外弱小目标检测新算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2009, **36**(6): 1075~1078
- Wu Yiquan, Wu Wenyi. Infrared small target detection based on adaptive prediction of background by variable neighborhood and step-size LMS algorithm[J]. *J. Astronautics*, 2009, **30**(2): 735~739
吴一全, 吴文怡. 基于变邻域变步长 LMS 背景预测检测红外弱小目标[J]. *宇航学报*, 2009, **30**(2): 735~739
- Hu Moufa, Chen Zengping. New small target detection algorithm via zernike-facet model and total least squares[J]. *J. Electron. & Info. Technol.*, 2008, **30**(1): 194~197
胡谋法, 陈曾平. 基于 Zernike-Facet 模型和总体最小二乘的弱小目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2008, **30**(1): 194~197
- Wu Yiquan, Wu Wenyi, Luo Zijuan. A method of small target detection in infrared image sequences based on the least absolute deviation and chaos-genetic algorithms[J]. *Acta Photonica Sinica* 2009, **38**(3): 736~740
吴一全, 吴文怡, 罗子娟. 基于最小一乘和混沌遗传算法检测红外小目标[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 736~740
- H. Leung, N. Dubash, N. Xie. Detection of small objects in clutter using a GA-RBF neural network [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2002, **38**(1): 98~118
- Zhang Yan, Shen Zhenkang, Wang Ping. Background estimation and the infrared small target detection based on RBF neural network[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2004, **26**(5): 39~45
张焱, 沈振康, 王平. 基于 RBF 神经网络的背景估计及红外弱小目标检测[J]. *国防科技大学学报*, 2004, **26**(5): 39~45
- David Casasent, Yu-Chiang Wang. A hierarchical classifier using new support vector machines for automatic target recognition[J]. *Neural Networks*, 2005, **18**: 541~548
- P. Wang, J. W. Tian, Ch. Q. Gao. Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM[J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(3): 156~158
- C. J. C. Burges. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Min Knowl. Disc.*, 1998, **2**: 121~167
- Wu Yiquan, Pan Zhe, Wu Wenyi. Tsallis-Havrda-Charvat entropy image thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(7): 53~58
吴一全, 潘喆, 吴文怡. 二维直方图斜分 Tsallis-Havrda-Charvat 熵图像阈值分割[J]. *光电工程*, 2008, **35**(7): 53~58