

基于显著性及主成分分析的红外小目标检测

胡 瞰^{1,2}, 赵佳佳¹, 曹 原¹, 王芳林¹, 杨 杰¹

(1. 上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200240;

2. 中国航天科工集团公司第二研究院, 北京 100854)

摘要: 将红外小目标检测作为目标与背景的二分类问题. 先根据点扩散函数原理, 仿真生成红外小目标训练样本, 再用主成分分析方法提取目标样本的主特征, 建立目标的主成分空间. 对测试样本, 只要判断其在主成分空间的重构残差, 便可识别其是否为目标. 为了提高算法的实时性, 提出了一种基于显著性和主成分分析的红外小目标检测算法, 先通过频域残差方法检测目标可能存在的显著性区域, 再在此区域内做识别. 实验结果证明该方法快速、有效.

关键词: 红外小目标; 目标检测; 显著性检测; 点扩散函数; 主成分分析

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

INFRARED SMALL TARGET DETECTION BASED ON SALIENCY AND PRINCIPLE COMPONENT ANALYSIS

HU Tun^{1,2}, ZHAO Jia-Jia¹, CAO Yuan¹, WANG Fang-Lin¹, YANG Jie¹

(1. Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of the Second Academy, China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100854, China)

Abstract: Infrared small target detection is considered as a binary classification problem between target and background. According to the principle of point spread function (PSF), infrared small target training set was simulated. Principal component analysis (PCA) was used to extract the main characteristics of target sample. Thus, the principal component space of the target was established. Each test sample can be recognized as either target or background by its reconstruction error in the principle subspace. In order to improve the real-time performance, an infrared small target detection algorithm based on saliency and PCA was proposed. Salient regions probably containing targets were firstly detected by using spectral residual approach. Then target recognition was performed in the salient regions. Experimental results indicate that the proposed algorithm is fast and effective.

Key words: infrared small target; target detection; saliency detection; point spread function (PSF); principal component analysis (PCA)

引言

红外小目标检测是红外搜索与跟踪系统、精确制导系统、红外预警系统、大视场目标检测系统、卫星遥感等系统中的一项核心技术^[1]. 小目标检测算法的实时性及精度将直接影响末端制导系统的有效性. 由于红外图像对比度低, 目标常被大量的杂波和噪声干扰, 且目标尺寸很小, 红外小目标检测研究已成为机器视觉和图像处理领域的一个热点、难点.

国内外学者提出了很多红外小目标检测方法:

Soni 等^[2] 根据图像的相关信息, 用二维最小均方 (TDLMS) 滤波器自适应地预测出被小目标覆盖的背景区域, 并通过图像相减来检测目标; Boccignone 等^[3] 提出了基于小波变换的红外小目标检测方法; 杨磊等^[4] 提出了基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. 本文将小目标检测作为目标与背景的二类模式分类问题. 先用显著性检测方法对图像预处理, 检测出小目标可能存在的显著性区域, 再在显著性区域内用主成分分析方法做识别, 判断其是否为目标. 实验结果表明, 该红外小目标检测方法快速而准确.

收稿日期: 2009-04-06, 修回日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (60675023, 60602012)

作者简介: 胡 瞰 (1981-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事红外图像处理的研究.

Received date: 2009-04-06, revised date: 2009-10-13

1 频域残差检测显著性

分析存在红外小目标的图像,我们发现人眼之所以可以区分目标,是因为目标的灰度分布和背景有差异,即目标的灰度较周围背景是显著的.图像中的噪声、杂波等与周围背景灰度不同的区域也是显著的.因此红外图像中小目标是显著性区域,而显著性区域除了包括目标外,可能还包括噪声、杂波等.我们以此为出发点,先检测出图像中的显著区域,再在此区域内做识别,便可检测小目标.

检测图像显著性的方法很多,频域残差^[5]是一种快速而有效的方法.设红外图像为 $I(i,j)$,则显著性图像 $S(i,j)$ 为:

$$\begin{aligned} A(f) &= \Re(\text{fft}[I(i,j)]) \\ P(f) &= \Im(\text{fft}[I(i,j)]) \\ L(f) &= \log(A(f)) \\ R(f) &= L(f) - h_n(f) * L(f) \end{aligned}, \quad (1)$$

$$S(i,j) = g(i,j) * \text{ifft}[\exp(R(f) + P(f))]^2$$

其中 \Re, \Im 分别表示复数的模和相位, $*$, fft , ifft 分别表示卷积, 傅里叶和傅里叶逆变换, $h_n(f)$ 及 $g(i,j)$ 分别为均值和高斯滤波器.

频域残差方法只要对图像做卷积、傅里叶及傅里叶逆变换等运算,其计算量很小,能满足实时性要求.图1为包含红外小目标的图像及对应的显著性检测结果.第一幅图像较简单,含有10个红外小目标,通过显著性预处理方法,目标很容易就被检测出来.第二幅图像仅含一个目标,目标背景的对比度很低,经显著性处理后,目标区域及部分噪声和背景变化区域都被作为显著性区域检测出来.为了更好地说明显著性检测出来的不仅仅是目标,而且还包括噪声等区域,第三幅图像中除了2个弱小目标外,人为地在图像的右上方加了一个较暗的干扰.显著性预处理后,干扰也被作为显著性区域检测出来.因此,还需经过识别环节,才能准确地检测出目标.

2 小目标样本生成

识别器一般都是通过样本训练获得,为了建立小目标识别器,必须获得一系列合理的目标训练图像.可直接在多幅真实的红外图像中,将小目标区域手工裁剪出来作为训练样本,但手工裁剪目标的精度不高,且工作量很大.根据点扩散原理,用高斯灰度函数对红外小目标进行建模^[6,7],也即红外小目标的扩散特性可以使用灰度最大值 I_{\max} ,水平扩散参数 σ_x 和垂直扩散参数 σ_y 按如下式进行描述:

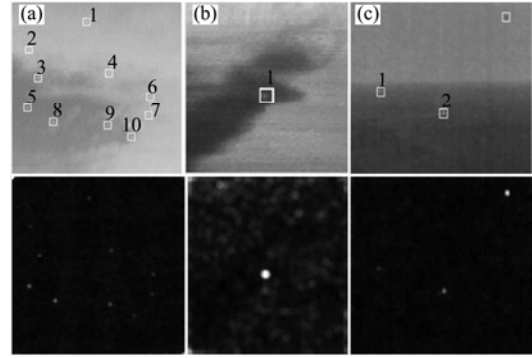


图1 红外小目标图像及对应的显著性预处理结果.第一行为原始红外图像,第二行为对应的显著性预处理结果
Fig.1 Infrared small images and their results after saliency preprocessing. The first row images are source infrared images. And the second row images are saliency detection results

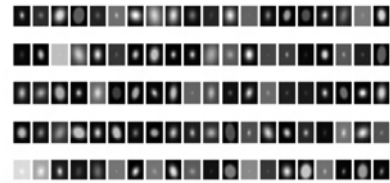


图2 点扩散函数生成的部分训练样本
Fig.2 Some training samples simulated by PSF

$$I(x,y) = I_{\max} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]\right), \quad (2)$$

其中 (x_0, y_0) 是小目标区域的中心点.图2是根据点扩散函数生成的100幅小目标图像.

3 主成分识别小目标

根据小目标训练样本,用主成分分析方法建立小目标识别器.设小目标训练图像大小为 $m \times m$,将 N 幅训练样本图像依次归一化,并转化为 $m^2 \times 1$ 的向量 x_i ,得到训练样本矩阵 X .依照主成分分析方法,小目标识别器可按如下步骤建立:

1. 求解训练样本的均值 u_x 及协方差矩阵 C_x ;
2. 计算 C_x 的特征值 λ_i 和对应的特征向量 p_i ,选取前 N' 个 ($N' < N$) 最大的特征值所对应的特征向量 $p_k (k=1, 2, \dots, N')$,组成目标的主成分空间 $P = [p_1, p_2, \dots, p_{N'}]$.

根据主成分分析原理,目标在主成分空间 P 的投影分量较大,而背景在主成分空间 P 的投影较小.因此对于测试样本只要判断其在目标主成分空间重构残差的大小,便可确定其是否为目标.设归一化测试样本为 z ,则其经空间 P 重构后的残差 z_e 为:

$$z_e = \|PP^T(z - u_x)\|, \quad (3)$$

其中, $\|y\|$ 表示向量 y 的模.为了使识别结果更明

显,定义如下目标识别指数:

$$O(z) = \exp(-z_c/2\delta^2) \quad (4)$$

显然, $O(z) \in (0, 1]$, 当 z 是目标向量时, z_c 很小, 而 $O(z)$ 较大; 反之, 当 z 是背景时, $O(z)$ 较小.

对于一幅待检测的红外图像, 在经过显著性预处理得到显著性图像后, 本文按如下方法识别检测小目标: 从左至右, 从上至下按像素依次扫描显著性图像的每个像素, 判断其显著性是否大于阈值 θ , 若小于阈值, 则不是目标区域; 否则以此像素为中心, 在原图像中取一个 $m \times m$ 的窗口, 并将其转换为 $m^2 \times 1$ 的测试向量 z , 然后根据式(4)求解其对应的目标指数. 当整幅图像扫描结束后, 由目标指数图像可得小目标检测结果.

4 实验结果及分析

使用上述方法对多幅红外图像进行实验. 实验中, 显著性图像阈值选为 $\theta = 0.09$, 根据点扩散函数随机生成大小为 11×11 的目标训练图像 400 张, 即 $N = 400, m = 1$. PCA 提取目标主成分空间时, 根据主成分分析原理, 选择总贡献率大于 98% 的那些特征值为主特征, 实验中选择 10 个主特征向量, 即 $N' = 10$, 同时选取 $O(z)$ 中的 σ^2 为 0.15.

图 3 显示了图 1 中 3 幅不同背景下红外小目标图像的检测结果. 图 1 中的第一和第二幅图像, 经过显著性预处理后, 虽然部分噪声被当作显著性区域检测出来, 但目标在图像中还是相对更显著的, 在识别环节中, 目标被很准确地识别出来. 第三幅图像中, 由于在右上方有一个人为添加的低灰度干扰, 经预处理后也被当作显著性区域检测出来, 目标甚至

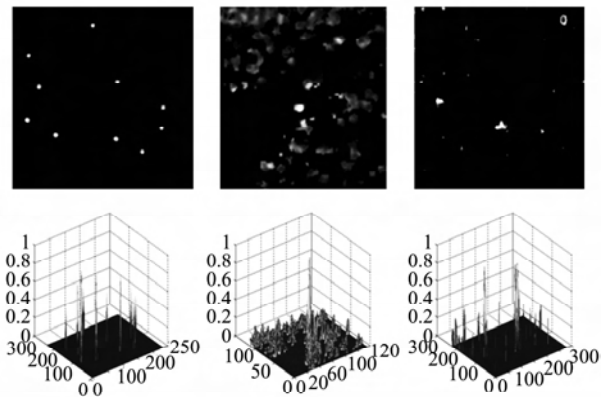


图 3 显著性区域主成分识别结果. 第一行为识别结果, 第二行为识别结果的三维显示

Fig. 3 Recognition results using PCA in salient regions. The first row images are recognition results and the second row images are the 3D show of the results

没有干扰显著, 但在识别过程中目标还是很准确地被识别出来, 而干扰得到了抑制. 为了保证目标检测的精度, 本文在实验中, 将 θ 选了一个接近 0.1 的较小值 0.09, 实验结果证明是合理的.

为了进一步衡量使用 PCA 的目标检测算法的有效性, 将 PCA 与最大-中值 (Max-Median) 滤波器^[8], 二维最小均方 (TDLMS) 滤波器目标检测算法, 进行数值上的比较. 选用的指标为局部信噪比 LSBR (local signal-to-background ratio) 和局部信噪比增益 LSBRG (local signal-to-background ratio gain). LSBR 定义如下 (单位 dB):

$$\text{LSBR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=L_x}^{H_x} \sum_{j=L_y}^{H_y} (A(i, j) - m_b)^2}{\sigma_b^2} \quad (5)$$

表 1 使用不同算法对图 1 中小目标图像进行检测后的 LSBR 和 LSBRG

Table 1 LSBR and LSBRG of several small target detection algorithms for Fig. 1

Image	Target	LSBR				LSBRG			
		M-Med	M-Mean	TDLMS	PCA	M-Med	M-Mean	TDLMS	PCA
Fig1 (a)	1	2.973	3.009	-0.038	<u>15.476</u>	1.653	1.689	-1.359	<u>14.156</u>
	2	0.157	-0.460	0.981	<u>15.910</u>	-3.238	-3.856	-2.414	<u>12.515</u>
	3	3.389	1.498	-4.252	<u>16.611</u>	1.039	-0.851	-6.602	<u>14.261</u>
	4	0.821	-1.239	-1.302	<u>14.774</u>	0.374	-1.686	-1.749	<u>14.327</u>
	5	2.025	3.137	-0.446	<u>18.392</u>	-2.422	-1.309	-4.893	<u>13.945</u>
	6	0.290	-0.223	-3.157	<u>15.913</u>	-2.117	-2.631	-5.565	<u>13.506</u>
	7	3.471	2.501	0.610	<u>15.746</u>	-0.308	-1.278	-3.169	<u>11.967</u>
	8	8.773	7.295	5.934	<u>17.652</u>	3.929	2.451	1.091	<u>12.808</u>
	9	7.423	5.589	5.272	<u>16.616</u>	-0.106	-1.940	-2.256	<u>9.087</u>
	10	0.868	-1.522	1.651	<u>16.143</u>	-8.841	-11.232	-8.058	<u>6.434</u>
Fig1 (b)	1	7.587	6.717	3.040	<u>22.280</u>	-3.315	-4.184	-7.862	<u>11.378</u>
Fig1 (c)	1	5.344	7.495	2.726	<u>15.458</u>	0.386	2.537	-2.233	<u>10.500</u>
	2	9.382	7.782	7.365	<u>13.698</u>	0.170	-1.430	-1.848	<u>4.486</u>

其中,坐标 (L_x, L_y) 和 (H_x, H_y) 界定了感兴趣区域,也即包含小目标的局部区域; $A(i, j)$ 为该区域内像素的灰度值, m_b 和 σ_b^2 分别是区域内目标周围背景的灰度均值和方差.较大的LSBR表明该区域目标相对于背景杂波而言更为显著,因而检测的效果也更好.LSBRG的定义如下:

$$\text{LSBRG} = \text{LSBR}_{\text{out}} - \text{LSBR}_{\text{in}}, \quad (6)$$

其中, LSBR_{in} 和 LSBR_{out} 分别是在进行小目标检测前后目标区域的LSBR.较大的LSBRG表明目标检测算法对于LSBR的提升越是明显,因而检测性能也越好.表1显示了使用不同算法对图1中3幅红外小目标图像进行检测后的LSBR和LSBRG,指标最优值均以下划线指出.在所有的算法结果中,使用PCA进行目标检测的LSBR和LSBRG最大.

本文从图像中目标的显著特性出发,对图像进行显著性预处理,再在显著性区域进行目标识别.事实上若不对图像预处理,直接采用 $m \times m$ 的窗口在原图像上滑动,并做识别,也可以获得目标检测结果.但在整幅图像上做识别将十分耗时,特别是当图像较大时,这种穷举式搜索识别方法将严重影响检测算法的实时性,在实用中不可取.表2比较了PCA及经过显著性预处理识别的算法SPCA对图1中3幅图像检测所花时间.实验是在P4 2.66G/1G及Matlab7.0平台下进行的.

表2 Matlab中两种检测算法的运行时间对比
Table 2 Comparison of the running time using PCA and SPCA in Matlab

Image	Running time(s)	
	PCA	SPCA
Fig. 1(a)	5.4688	0.0625
Fig. 1(b)	1.0156	0.2656
Fig. 1(c)	4.5380	0.0469

5 结论

提出了一种基于显著性及主成分分析的快速红外小目标检测方法(SPCA).将小目标检测分为预处理和识别两个过程,预处理环节采用频域残差方法,快速地检测出含有小目标及部分噪声的显著性区域,识别环节通过主成分识别器识别目标和噪声.实验结果表明该方法是快速和有效的.

REFERENCES

- [1] Liu Yun-He, Si Xi-Cai, Jiao Shu-Hong, et al. Study of detection algorithm for infrared small target[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance* (刘云鹤, 司锡才, 焦淑红, 等. *火箭与制导学报*), 2008, **28**(1): 53—55.
- [2] Soni T, Zeidler R, Ku W H. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filters for detection of small objects in image data[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, **2**(3): 327—340.
- [3] Boccignone G, Chianese A, Picariello A. Small target detection using wavelets[J]. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Pattern Recognition*. 1998, **2**(8): 1776—1778.
- [4] Yang Lei, Yang Jie, Zheng Zhong-Long. Detecting infrared small target based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 41—45.
- [5] Hou X D, Zhang L Q. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach[J]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007, **800**: 1—8.
- [6] Anderson K L, Iltis R A. A tracking algorithm for infrared images based on reduced sufficient statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997, **33**(2): 464—472.
- [7] Liu Z, Chen C, Shen X, et al. Detection of small objects in image data based on the nonlinear principal component analysis neural network[J]. *Opt. Eng.* 2005, **44**(9): 1—9.
- [8] Deshpande S D, Er M H, Ronda V, et al. Max-Mean and Max-Median filters for detection of small targets[J]. *SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*. 1999, **3809**: 74—83.