

文章编号 1004-924X(2006)05-0922-07

空中目标的免疫识别算法

杨照华¹, 祁振强², 房建成¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要: 基于生物免疫系统的自我-非我识别能力, 采用新的检测器生成方法和匹配规则, 综合识别目标的先验信息, 提出一种基于阴性选择的免疫识别算法。结合空中军事目标的检测和识别问题, 对提出的算法进行了应用研究。实验结果表明, 基于阴性选择的免疫识别算法用于目标检测和识别可以识别已知类型 and 未知类型目标, 漏判率为 0.375%, 误判率为 0.006%, 检测精度达 99.563%, 而且对不同的入侵目标表现出很好的鲁棒性。

关键词: 人工免疫算法; 自我-非我识别; 目标识别; 阴性选择

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Immune recognition algorithm and its application to air target detection and recognition

YANG Zhao-hua¹, Qi Zhen-qiang², Fang Jian-cheng¹(1. *School of Instrumentation Science & Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;*2. *Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China*)

Abstract: On the basis of the function of self/nonsel self recognition of natural immune system, a new immune recognition algorithm based on negative selection is presented. In proposed algorithm, the generation of detector set is improved and a new matching rule is also introduced to online matching detection. Moreover, the prior knowledge of the known target samples and the content update of the detector set are also considered. The proposed immune recognition algorithm is applied to detect and recognize the air targets, not only are the known types of targets detected and recognized, but also the unknown types of targets are detected. Experiment results show that the undetected error rate, the misrecognition error rate and the detection precision are 0.375%, 0.006% and 99.563%, respectively. Meanwhile the detection process demonstrates good robustness for different targets.

Key words: artificial immune algorithm; self-nonsel self recognition; target recognition; negative selection

1 引言

近年来,高精度、高分辨率、强识别目标能力、抗干扰性能好的成像末制导技术,成为制导技术研究的热点和难点之一,图像目标检测和识别技术与红外技术相结合广泛应用于战略导弹、战术导弹及反空间武器系统中,力图实现在复杂战场环境中精确命中目标乃至要害部位。

目标检测和识别的经典算法大都基于全局搜索、目标运动轨迹的匹配、双向投影变换和三维处理相结合、像素统计量、马尔可夫变换、速度匹配滤波、高阶相关技术等理论^[1-5]。人工智能、模式识别与非线性信号处理技术的发展,使小波、神经网络、遗传和分形理论等方法也进入目标检测和识别的研究领域^[6-10]。这些研究方法丰富了目标检测和识别的研究内容,取得了一定程度的研究进展。

上述各种研究方法都以被检测目标的模式为研究对象,观察检测图像中是否出现与该目标模式相匹配的特征而判断目标出现与否和类型归属,遵循阳性选择的检测和识别机制。对于已知类型的入侵目标,这些方法在一定检测精度下可以完成目标的检测和识别,但是当检测图像与已知目标模式无匹配行为发生时,这些方法难以区分究竟是无目标入侵,还是入侵了未知类型的目标。

人工免疫系统已成功应用于计算机网络安全、故障诊断等领域的模式识别,而目标检测和识别问题与其十分相似,该系统有可能为目标检测和识别研究带来更新颖、更有效的理论和方法。本文将结合军事或航空航天领域的目标检测和识别问题,对所提出的基于阴性选择原理的免疫识别算法进行应用研究。

2 基于阴性选择的免疫识别算法

基于生物免疫系统的自我—非我识别原理,从检测器生成、先验信息利用、匹配规则定义等方面对现行的阴性选择算法^[11]进行改进,提出了一

种新的异常检测和识别算法—免疫识别算法。

2.1 检测器生成方法

基于生态理论的小生境技术对于种群的生成有着良好的启示作用。引入小生境进化方法,取代传统的随机化方法,可以使得生成检测器的运算时间大大减少;小生境进化过程中的多目标收敛也有助于确定检测器的合适数量。

改进后的检测器生成过程如下:

- (1) 随机产生检测器集合 D , 将每一个检测器的适应度初始化为 0;
- (2) 从 D 中随机选出 N 个检测器样本;
- (3) 从自我中随机选出一个单一类型;
- (4) 样本中每个检测器都与该单一类型反向匹配, 评价两者的相似度;
- (5) 样本中反向匹配获得最高分值(即相似度表现最差)的单一检测器的适应度值被奖励增加, 而其他检测器的适应度值保持不变。
- (6) 重复步骤(2)至(5), 循环次数为检测器样本数目 N 的 3 倍^[12];
- (7) 适应度较高的 $P_b\%$ 检测器被选为父代, 利用单点交叉算子和随机变异算子产生新的检测器;
- (8) 适应度最差的 $P_w\%$ 检测器被删除, 为新产生的子代释放空间;
- (9) 新检测器种群包括选择的父代检测器和步骤(7)生成的子代检测器;
- (10) 重复步骤(2)至(8), 直到适应度值不再变化为止。

2.2 匹配规则的建立

常用的 r 连续位匹配方法只考虑了匹配双方字串中 r 连续位的信息, 对于字串整体的信息没能充分利用。本文采用下述计算匹配分值的方法。

先计算不匹配位的长度, 根据下式计算匹配分值, 式中 Count 是字符串中不匹配的总数的长度。

$$\text{Matching score} = \text{Count} + \sum_{i=1}^m 2^i.$$

其中 $\{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 为匹配字串的长度。匹配分值计算的示例如图 1 所示, 图中只显示了一组 8 位代码的计算情况。

自我集合	1 1 0 0 0 0 0 1
检测器	0 1 0 1 1 0 1 0
异或操作	1 0 0 1 1 0 1 1
Count	1 2 2 =5
匹配分值	$5+2 \times 1+2 \times 2+2 \times 2=15$

图 1 匹配计算

Fig. 1 Matched computation

上述匹配规则中任何匹配情况(无论是连续位还是仅有一位)都会对匹配分值的计算做出贡献,而连续匹配位数越长对匹配分值的贡献越大。可见,匹配双方的信息考虑得更为全面。

分析检测器和测试对象的匹配过程时,跳过异或操作环节而直接计算匹配位的情况。

2.3 先验信息的利用

现行的阴性选择算法只能检测有无异常模式发生,而无法检测到所发生的异常模式属于哪一类型。实际应用中,人们对异常模式的一些类型已经有所了解,充分利用这些先验信息将有助于拓展算法性能。

把先验信息融入检测器集合,则使算法具备了检测和识别两种功能。将已知异常模式的类型信息编码 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ 加入到检测器集合中,并与原有的所有检测器进行匹配,根据匹配情况对检测器集合分别以 M_i 为中心进行聚类,并将能与一种以上异常模式发生匹配的检测器清除。在聚类过程中还要减少类内相似性较强的检测器,降低检测器集合的冗余性。最后得到新的检测器集合 R' , 即 $R' = (R_1', R_2', \dots, R_n', R_{n+1}')$, 其中 $R_i' (i=1, 2, \dots, n)$ 为只与第 i 类异常模式发生匹配的检测器子集,而 R_{n+1}' 由聚类后剩余的所有检测器组成,它不能与任何已知类型异常模式发生匹配,它检测的是未知类型的异常模式。

可见,新检测器集合 R' 不仅能检测有无异常模式发生,而且还能检测到所发生的异常模式是属于已知的哪一类型还是属于未知类型。

2.4 检测器集合的更新

如果检测到未知类型的异常模式,经进一步分析提取有关特征信息之后,将其定义为新的已知类型。将这个新的“已知类型”加入到检测器集合中,采用第 2.3 节的方式进行检测器集合数据的更新,也就是对 R' 中的 R_{n+1}' 进行再度的聚类细分。

3 免疫识别算法用于目标检测和识别

免疫识别算法用于空中军事目标检测和识别问题,主要思想是把目标的入侵视为被保护空间区域的图像出现异常变化,所依据的基本原理主要是:

(1) 将无目标入侵空域图像的模式特征定义为“自我”信息,并将这些“自我”信息表示为一个在有限字符集上的长度为 l 的等长字符串集合 S 。目标检测过程中将对这些“自我”信息进行监测;

(2) 利用第 2.1 节的方法生成一组检测器 R , R 集中的每个检测器依据 2.2 的匹配规则不能与 S 集中的“自我”信息发生匹配;

(3) 把包含入侵目标图像的模式特征作为先验信息,利用第 2.3 节的方法对 R 进行聚类,得到新的检测器集合 R' ;

(4) 目标检测过程中,将 R' 中的检测器与监测空域图像进行匹配。一旦发生匹配,则相应检测器被激活,且表明目标入侵;

(5) 根据被激活的检测器进行入侵目标类型的识别。若为已知类型,则迅速采取相应的应对措施;若为未知类型,则提取该目标的特征信息,按第 2.4 节所述方法进行检测器集合更新。

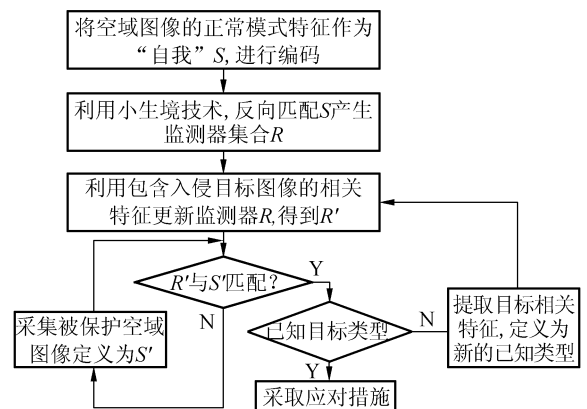


图 2 目标检测和识别流程图

Fig. 2 Flow diagram of targets detection and recognition

空中军事目标检测和识别的完整流程如图 2 所示。图 2 描述了免疫识别算法用于图像目标检测和识别的总体过程,在具体的实施过程中还要涉及到空域图像获取及预处理、图像特征提取、检

测器训练、目标检测等环节,构成图 3 所示的模式识别系统。

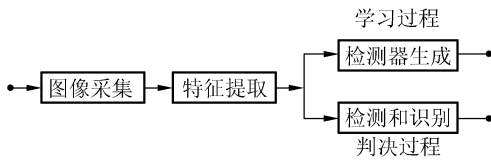


图 3 目标检测和识别系统框图

Fig. 3 Block diagram of targets detection and recognition system

模式采集组合完成空域图像的采集,可以选用各种各样的传感器、测量装置或图像录取输入装置完成,图像采集之后还要进行相关预处理操作。特征提取组合实现由模式空间向特征空间的转变,有效压缩模式空间的维数。检测器实现对空域图像类别属性的分类判决,为设计检测器,首先应确定分类错误率的要求,选用适当的判决规则。检测器生成是一个离线学习训练的过程。

3.1 图像预处理

3.1.1 图像增强

成像传感器成像与传输过程中时常会引起图像信噪比的降低,而且采集的图像由于种种原因,其灰度分布可能不太均衡,从视觉效果上看会出现偏暗、偏亮或灰度过于集中等现象。针对不同的视觉情况,采取相应的变换函数进行增强处理。本文采用中值滤波方法,既可有效去除图像中的噪声干扰,又较好地保持了图像的边缘信息。

3.1.2 图像分割

图像分割根据图像的某些特征或特征集合的相似性准则,对图像像素进行分组聚类,把图像划分成若干互不交迭区域的集合。本文采用 Sobel 边缘检测方法实现图像分割,既使得图像分析、识别等高级处理阶段需要处理的数据量大大减少,同时又保留有关图像结构特征的信息。

3.2 图像特征提取

图像的原始特征是在模式采集过程中形成的所有样本测量值。通过映射或变换的方法,把模式空间的高维特征变成特征空间的低维特征的过程称为特征提取。提取的图像特征应具备区别性、可靠性、独立性、数目小等性能,常用的图像特征包括图像灰度特征、图像纹理特征、图像的几何特征、图像的形状特征等。

特征提取往往以在分类中使用的某种判决规

则为准则,所提取的特征在此规则下的分类错误率应尽可能的小。根据模式识别的类内类间距离准则,希望同类样本之间距离越小越好,即类内散射尽可能小,而不同类样本之间的距离越大越好,即类间散射尽可能大。基于这一准则,分别研究 10 幅无目标入侵空域图像和包含入侵目标序列图像的灰度均值、灰度方差和灰度梯度,如图 4 所示。

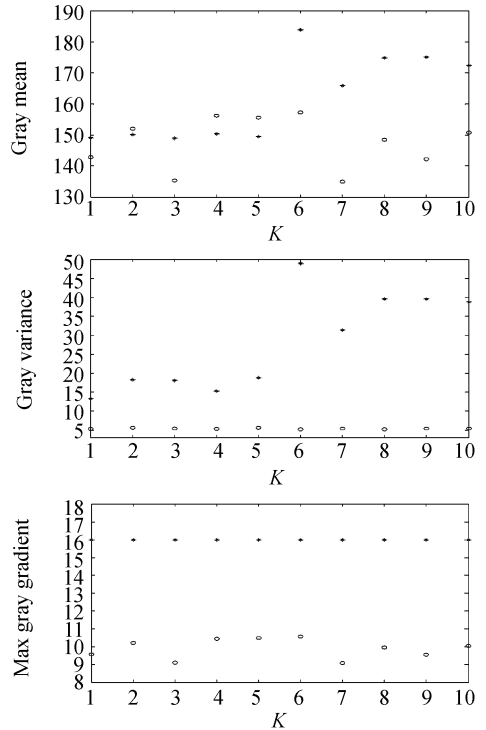


图 4 序列图像的灰度均值、灰度方差和灰度梯度
Fig. 4 Gray mean, gray variance and gray gradient of sequence images

图中“*”描述含目标空域图像的特征量,“○”描述不含目标空域图像的特征量。可以看出,在有目标存在和无目标存在的情况下,图像灰度方差和最大灰度梯度有着很明显的差别,而灰度均值存在混叠区域,差别不明显。图像灰度方差和灰度梯度受入侵目标大小、形状等因素的影响较小,可用性较好,所以选择并提取这两个特征用于目标检测和识别研究。

3.3 检测器生成

检测器的生成包括基于小生境技术的进化过程和利用先验知识的聚类优化过程,广义地讲,还包括检测器的更新过程。

无目标入侵空域图像的样本可以在天空背景

的基础上利用现有的声音、光电、烟雾等手段模仿战争状态,人为地构造各种典型样本。定义这些样本为“自我”集合,利用第 2.1 节的方法产生检测器集合 R 。

选取包含有代表性入侵目标的空域图像,其中包含的入侵目标应该是在军事、国防、航空航天领域中具有典型性,而且所包含的目标应处于视野的不同位置、不同姿态。提取这些图像的灰度方差和灰度梯度,编码后放入已建立的检测器集合 R 中,利用第 2.3 节的方法对 R 进行聚类,得到新的检测器集合 R' 。

上述过程是在离线条件下完成的。在线检测的过程中,如果检测到未知类型的入侵目标,完成目标特征提取和类型归属认定之后,利用该目标的特征信息依第 2.4 节的方法对检测器集合进行在线更新。

3.4 目标检测与识别

免疫识别算法可以同时完成两个任务:一是判断是否有目标入侵,二是如果有目标入侵,判断其为未知类型还是已知的哪一类型。

3.4.1 目标检测

目标检测判断是否有目标入侵。实时监控被保护空间区域,在线捕获该区域的数字图像,将其作为测试图像与检测器集合进行匹配实验。匹配实验中,采用正向匹配的方式,也就是根据匹配分值判断测试图像的相关特征与检测器的相关特征的相似程度。对于某一测试图像,如果没有匹配发生,则表明现在无目标入侵;如果测试图像与任一检测器发生匹配,且超过一定的阈值,则认为此时有目标入侵,通过声音、图像等报警信息提示操作人员,进入预警状态。

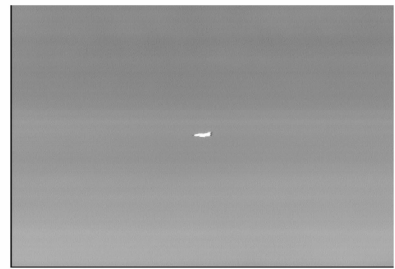
3.4.2 目标识别

目标识别判断入侵目标的类型归属。测试图像与检测器发生匹配后,检测器集合中的该检测器被激活,根据所激活的检测器,判断该入侵目标类型。如果入侵目标属于已知的某一类型,则迅速采取相应的应对处理措施;如果入侵目标属于以前从未遇到过的未知类型,在实施防御措施的同时,要进一步采集、分析目标的特征信息,确定该目标的类别属性,并定义为新的目标类别。

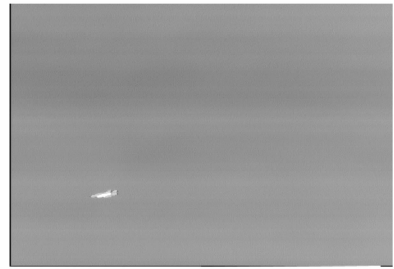
4 实验结果与分析

应用本文提出的目标检测算法,对多幅被保

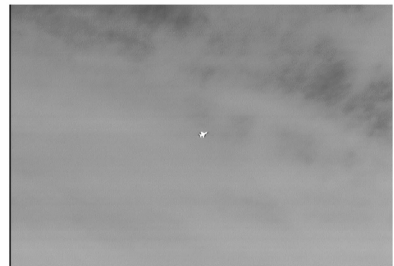
护空域中拍摄得到的红外数字图像进行了实验,研究图像如图 5 所示。



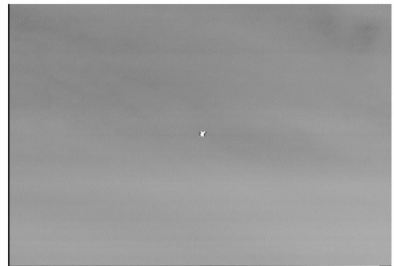
plane1.bmp



plane2.bmp



plane3.bmp



plane4.bmp



plane5.bmp

图 5 原始的红外图像

Fig. 5 Original infrared images

从这些红外图像中随机截取不同大小的区域作为测试图像,其中既包括不含目标的各种情况,也包括包含不同大小、不同形状目标的情况,而且测试图像的分辨率也不完全相同。利用建立的检测器集合,对上述方法构成的 1 600 幅测试图像进行了目标检测实验,实验结果如表 1 所示。其中,测试图像每组为 20 幅,试验结果中的漏检是指含有目标图像未被检测到的情况,误检是指对不含目标的图像发生错判的情况。

表 1 目标检测与识别的结果比较

Tab. 1 Comparison of target detection and recognition

测试图像		检测与识别结果(幅)			
来源	分辨率	测试组数	正确识别	漏检	误检
plane1. bmp	30×10	10	200	0	0
	30×20	10	199	1	0
	60×20	10	199	1	0
plane2. bmp	60×40	10	198	2	0
	30×10	5	100	0	0
plane3. bmp	60×20	5	100	0	0
	30×10	5	99	1	0
plane4. bmp	60×20	5	99	1	0
	30×10	5	100	0	0
plane5. bmp	60×20	5	100	0	0
	30×10	5	100	0	0
	60×20	5	99	0	1

从表 1 的实验结果可知,漏判率(含有目标图像未被检测到的比率)为 0.375%,误判率(对不含目标的图像发生错判的比率)为 0.006%,从而所建立的检测器成功的目标识别率达到 99.563%。

上述实验结果说明基于阴性选择的免疫识别算法用于目标检测和识别可行,而且对于不同的入侵目标表现出较好的鲁棒性。

从算法的实际运行来看,免疫识别算法用于目标检测和识别的过程主要是基于多个并行的匹

配过程,操作简便,运行效率高。基于神经网络的目标检测和识别,每次操作都要经历多层串行计算,算法执行过程复杂。不过相比神经网络,免疫识别算法进行目标检测和识别占用的数据空间相对较大。

针对实验中漏判和错判的结果,对基于免疫识别算法的目标检测和识别进行了误差源分析,发生误判的原因可能有以下几方面:

(1) 选取的样本图像中可能混入一些代表性较差的图像,主要记录图像次要信息,这将直接导致所形成的检测器集合中存留了个别不合理检测器未被剔除,在检测过程中发生误判或漏判。在检测器生成过程中加入更多专家经验知识,可进一步提高识别率。

(2) 检测过程中的匹配阈值、检测概率等数值的确定具有一定的人为性也会导致检测误差的出现。

(3) 图像特征提取只选用了图像的灰度方差和灰度梯度两个指标,涵盖的图像信息仍旧较少,如果再提取图像的颜色、纹理等特征信息综合利用,会进一步提高识别率。

(4) 图像预处理和特征提取过程中所进行滤波、图像增强、区域分割等一系列处理环节也不可避免地产生一定的误差。

5 结 论

本文基于生物免疫系统的自我-非我识别能力,采用新的检测器生成方法、新的匹配规则,并充分利用先验信息,提出一种基于阴性选择的免疫识别算法。结合空中军事目标的检测和识别问题,对提出的算法进行了应用研究。实验结果表明,基于阴性选择的免疫识别算法用于目标检测和识别检测精度和执行效率高,且对不同的入侵目标表现出好的鲁棒性。最后,对试验结果进行了误差源分析。

参考文献:

- [1] STEPHANE F G, CHRISTOPHE D, JEAN-PAUL S. Application of multi-scale of edges to motion determination [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*. 1998, 46(4): 1174-1179.
- [2] HONG L, WERTHMAN J R, BIEMAN G S, et al. A multiresolutional approach to target tracking[C]. *IEEE Trans. on AES*. 1993, 33(6): 388-392.
- [3] PAL S K, PAL N R. Segmentation using contrast and homogeneity measure[J]. *Pattern Recognition Letters*. , 1987, 5(3): 293-304.

- [4] MANJUNATH B S, CHELLAPPA R. Unsupervised texture segmentation using Markov random field models[J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1991, 13(5): 479-482.
- [5] ARCASAY C C, OUYANG G. Analytical solution of alpha-beta-gamma tracking filter with a noisy jerk as correlated target maneuver model[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1997, 33(1): 347-353.
- [6] MALLAT A. Theory for multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [7] NASRABADI N M, CHOO C Y. Hopfield network for stereo vision correspondence[J]. *IEEE Trans. on Neural Network*, 1992, 3(1): 5-1.
- [8] 陈晓钟, 孙华燕. 一种自然纹理背景下的图像目标检测方法[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(5): 421-424.
CHEN X ZH, SUN H Y. Targets detection method for image under nature texture background[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 421-424. (in Chinese)
- [9] 李正东, 王晓菊. 利用小波变换进行目标识别的方法研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 216-220.
LI ZH D, WANG X J. Method of target recognition by wavelet transform[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2001, 9(3): 216-220. (in Chinese)
- [10] 林玉池, 崔彦平. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 509-501.
LIN Y C, CUI Y P. Study on edge detection and target recognition in complex background[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 509-501. (in Chinese)
- [11] HOFMEYR S, FORREST S. Architecture for an artificial immune system[J]. *Evolutionary Computation Journal*, 2000, 8(4): 443-473.
- [12] FORREST S, JAVORNIK B, SMITH R E, *et al.* Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system[J]. *Evolutionary Computation*, 1993, 1(3): 191-211.

作者简介: 杨照华(1975—), 女, 北京航空航天大学博士后, 主要从事气动光学、导航、制导方面的研究。yangzh@buaa.edu.cn