

文章编号: 1672-8785(2019)01-0016-08

基于最优可免域神经免疫网络的 深度模糊红外目标提取算法

于 晓* 周子杰 高 强

(天津理工大学电气电子工程学院, 复杂系统控制理论与应用重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 深度模糊是模糊红外图像的一类表现特征, 准确提取红外图像的深度模糊区域是提取模糊红外目标的基础。基于生物免疫系统在抗原检测、提取和消除上表现出识别、学习、记忆、耐受和协调配合等优异特性, 结合生物免疫中神经系统与免疫系统相互作用的关系, 提出了一种基于最优可免域神经免疫网络的深度模糊红外目标提取算法。该算法通过设计神经网络能给进行模糊红外图像目标与背景分类的免疫网络以指导作用。依靠独立于免疫系统神经网络先验知识的作用, 设计了最优可免域神经免疫网络, 实现了针对深度模糊红外目标的准确提取。实验结果证明, 相对于其他传统目标提取算法, 该算法能更有效和更准确地提取模糊红外目标图像中的目标。

关键词: 目标提取; 可免域; 深度模糊红外图像

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.004

Deeply Blurred Infrared Target Extraction Based on Optimal Immune Field Neural Immune Network

YU Xiao*, ZHOU Zi-jie, GAO Qiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, and Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Deep blurring is a kind of expression feature of blurred infrared images. The accurate extraction of the deeply blurred region in infrared images is the foundation of extracting blurry infrared targets. On the basis of the excellent characteristics of recognition, learning, memory, tolerance and coordination exhibited by biological immune systems in antigen detection, extraction and elimination, a deeply blurred infrared target extraction algorithm based on optimal immune field neural immune network is proposed by combining the relationship between the nervous system and the immune system in biological immunity. The algorithm can provide a guiding role for the immune network in target and background classification of blurred infrared images by designing a neural network. By relying on the function of prior knowledge of neural network independent of the immune system, an optimal immune field neural immune network is designed and accurate extraction of

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61502340); 天津市自然科学基金 (18JCQNJC01000); 天津市教委科研计划项目 (2018KJ133); 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室开放基金 (TJKL-CTACS-201907)

作者简介: 于晓 (1985-), 男, 山东临沂人, 讲师, 主要研究方向为机器视觉与人工智能。

E-mail: yx_tjut@163.com

blurred infrared targets is implemented. The experimental results show that the algorithm can extract targets in blurred infrared target images more effectively and accurately than other traditional target extraction algorithms for blurred infrared target images.

Key words: target extraction; immune field; deeply blurred infrared image

0 引言

生物神经系统的神经元能依靠特定的信号途径传递产生有效免疫应答所需要的信号, 从而影响免疫系统^[1]。这种神经系统和免疫系统之间相互作用的关系能够用于人工免疫系统的设计。目前这类人工免疫系统在红外图像处理领域的应用研究已有一定的成果^[2,3]。红外图像技术是一种将不可见热辐射转化为可见热像图的非接触检测技术, 在各个领域都具有重要应用^[4-5]。刑侦案发现场中, 利用红外成像技术对现场痕迹进行快速检测并精确定位, 有助于分析案发现场的情况。然而由于外界环境因素的影响, 实际应用中采集的红外图像与理想条件下的红外图像相比, 其模糊程度更深更复杂, 目标和背景交界处呈现深度模糊区域。目标边缘模糊是深度模糊红外图像的特点。因此, 提取边缘深度模糊的红外目标是红外图像技术应用于公安刑侦等领域需迫切解决的科学与技术问题。

对于红外图像的目标提取算法研究, 近年来国内外学者取得了不少令人满意的成果。2016 年, 付冬梅等人^[6]提出了一种基于流形正则化多核半监督分类的提取方法, 利用流形正则获取空间位置信息特征, 建立半监督分类模型, 进行类别分类, 实现模糊边缘红外目标的提取。Li S Y 等人^[7]针对高速红外空空导弹制导图像的对比如度低、信噪比差、目标与背景灰度耦合性强的特点, 提出了一种基于直方图和空间约束的核模糊聚类分割算法。刘敏等人^[8]针对红外图像结构复杂且有大量噪声影响分割效果问题, 结合粒子群优化算法和脉冲耦合神经网络的优点, 提出了一种粒子群优化算法和脉冲耦合神经网络的红外图像分割方法 (Particle Swarm Optimization-Pulse Coupled Neural Network, PSO-PCNN)。2018 年, Bai

X Z 等人^[9]针对红外行人目标的弱对称性问题, 提出了一种改进的模糊 C-均值聚类方法, 结合由马尔可夫随机场理论引入的几何对称信息, 实现了对红外行人目标的提取。

但这些算法处理的红外图像多属于红外小目标及线性模糊的红外目标。对于深度边带模糊的红外手印图像, 这些算法并不适用。生物免疫系统在抗原检测、提取和消除上表现出识别、学习、记忆、耐受和协调配合等目前复杂系统优化策略所缺乏的优异特性^[10]。借鉴生物免疫的作用规则设计, 利用针对模糊红外图像目标提取的人工免疫算法, 能有效提取图像中目标的结构信息和邻域关系。因此本文针对深度边带模糊的红外图像, 借鉴生物免疫中免疫系统与神经系统相互协调作用的关系, 设计一种基于最优可免域神经网络的边带模糊红外目标提取算法。

1 问题分析

图 1 是一种刑事案件红外痕迹的场景分析。图 1(a)中, 当罪犯袭击受害者时, 嫌疑人的手与墙面接触后会残留其温度痕迹, 这种温度痕迹在可见光环境下是不可观测的。图 1(b)中, 对案发现场勘察时, 这种痕迹通常会被忽视; 而红外成像技术能够根据不可见热辐射将温度信息转化为可见热像图。图 1(c)是对案发后 4 min 的环境拍摄的红外图像。从图中可发现, 在可见环境下无法观测到的痕迹, 在红外图像中能被观测到。

由于热传递作用, 红外手印痕迹图像特征随时间变化不断变模糊。为了掌握手印痕迹信息, 准确提取模糊红外手印图像是本文研究的重要内容。本文主要研究案发后 4 min 的模糊红外手印图像, 深入分析该红外图像的特征。图 2 是案发 4 min 后手印痕迹图像及其边带模糊的图像特征。

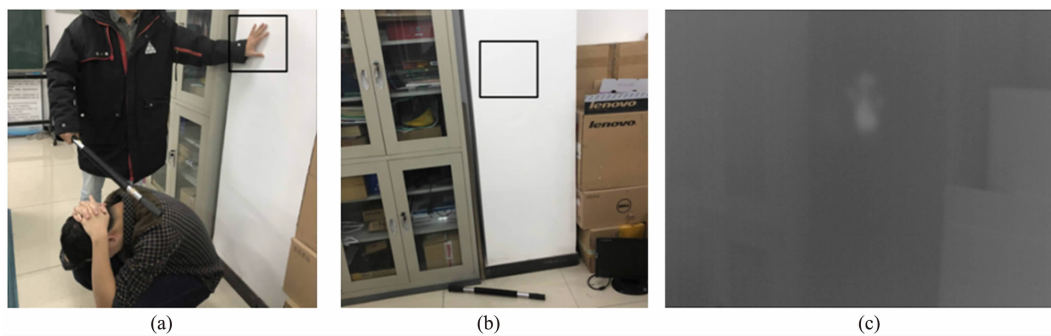


图 1 红外痕迹场景

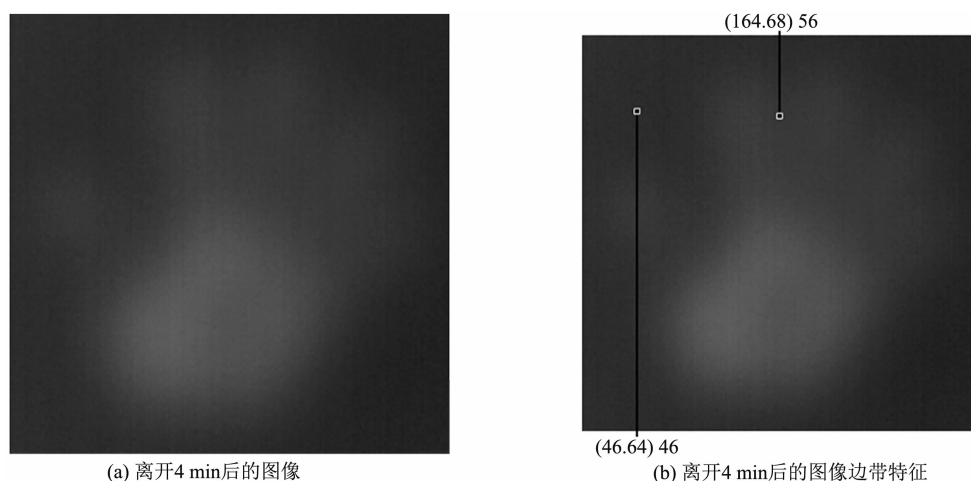


图 2 离开 4 min 后的红外手印图像

从表面的红外图像特征来看，由于热传递效果，4 min 后的手印痕迹目标本身变模糊，导致目标与背景之间的对比度急剧下降；一般红外环境下已出现目标位置及轮廓辨识困难的情况。对其灰度信息进行检测后，从图 2(b)的结果能够发现，同属于背景区域的灰度特征存在较大差异。热传递作用使背景与目标的边界灰度值升高，出现边缘模糊的情况，从而使目标

的轮廓变模糊，不利于红外目标的准确提取。

对于此类模糊红外手印图像，不仅目标与背景之间存在更深更复杂的模糊特征，而且图像整体的对比度很低。这些图像特征加大了目标提取与识别的难度。为说明这种情况，我们利用传统分割算法对此类边带模糊的红外目标图像进行了简单的效果比对，案发 4 min 后红外手印目标提取的结果如图 3 所示。

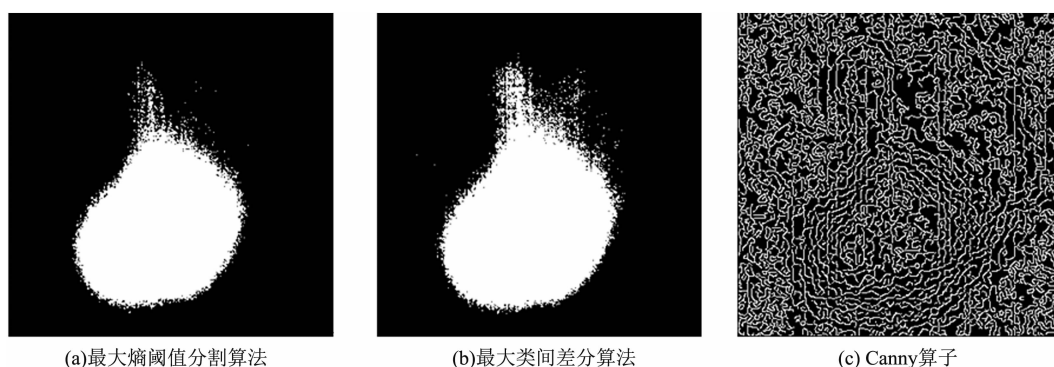


图 3 传统算法提取效果图

从结果图来看, 利用传统最大熵阈值分割算法和最大类间差分算法仅能提取出手掌区域, 并且提取区域中的噪点较多, 无法完整提取出手指部分。另外, 由于深度模糊的红外图像的噪点较多, 边缘检测算子无法检测到目标的边缘区域, 检测的边缘无法完成对手印痕迹的识别。

2 最优可免域神经免疫网络边带模糊红外目标提取算法

本节针对边带模糊的红外图像, 借鉴生物免疫中人类机体免疫机制原理, 提出一种最优可免域神经免疫网络边带模糊红外目标提取算法。根据人类机体中神经系统与免疫系统的相互作用, 构筑人体免疫防御网络的效果, 该提取算法的具体流程图如图 4 所示。

2.1 免疫网络的作用

生物免疫系统由先天性免疫因子与适应性免疫因子共同作用^[11]。本文借鉴生物免疫过程机理, 先天性免疫因子与适应性免疫因子相

互联结, 共同构筑免疫网络。通过设计模糊的红外图像抗原集, 通过先天性免疫识别作用初步确定病原体目标的范围。将图像抗原集分为背景抗原集、目标抗原集与边带模糊抗原集。

作为一种常用的目标提取方法, 传统阈值分割算法对本文处理的边带模糊红外手印图像所具备的低对比度且目标尺度适中的特点拥有较好的提取效果。但要通过获取适当的全局阈值来划分目标和背景区域是十分困难的。因此本文设计了一种自动预处理方法, 利用传统阈值分割算法获取图像的最佳阈值 T , 并根据边带模糊红外图像目标边缘的带状模糊的特点, 以该最佳阈值为中心, 确定一个范围系数 α , 从而将模糊红外图像划分为目标区域、背景区域和模糊区域, 对应于免疫网络划分的三个部分。预处理分割图像的结果 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) \geq T + \alpha \\ I(x, y), & T - \alpha \leq I(x, y) < T + \alpha \\ 0, & I(x, y) < T - \alpha \end{cases} \quad (1)$$

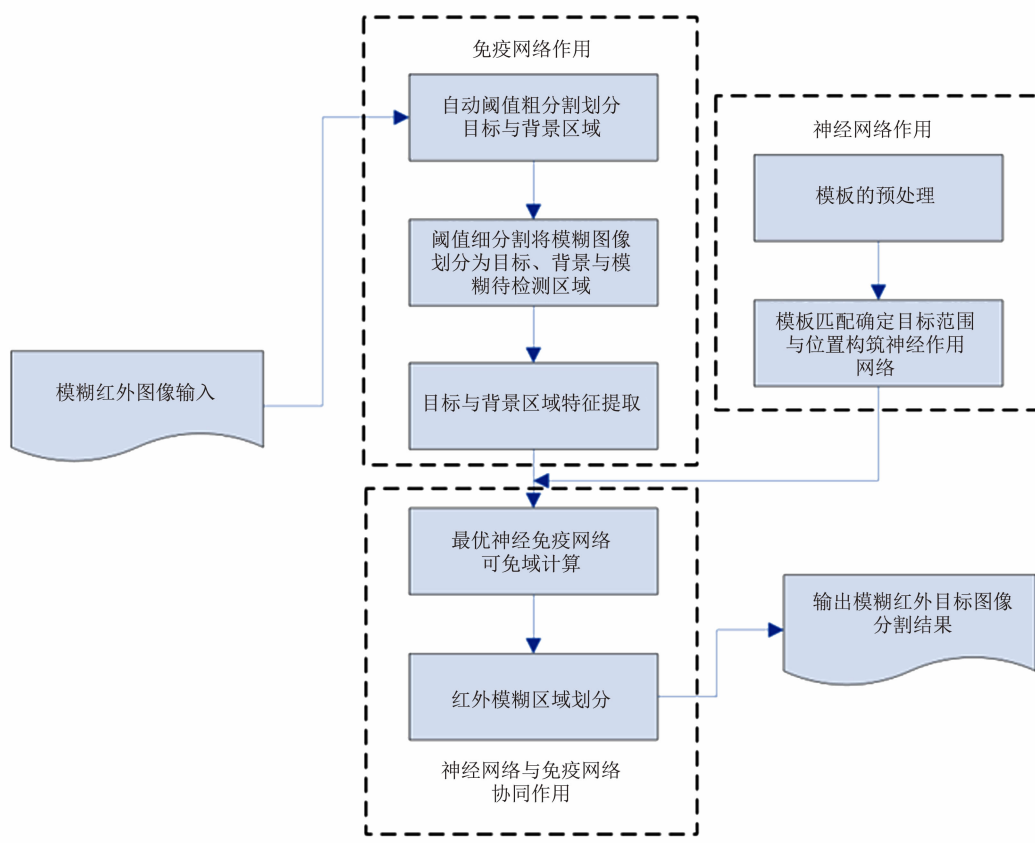


图 4 最优可免域神经免疫网络提取算法的流程图

预处理划分模糊红外图像的作用主要是通过最佳阈值的范围扩张,将原本通过无法精确获取的合适全局阈值来划分目标和背景的问题,转变为将模糊图像划分为绝对目标区域、绝对背景区域和模糊待划分区域的问题,极大地缩小了检测的范围。预处理的分割效果如图 5 所示。

2.2 神经网络与免疫网络的协同作用

生物的神经系统是机体内对生理功能活动调节起主导作用的系统。众所周知,交感神经系统在调节炎症条件中起关键作用,在类风湿性关节炎中通常能观察到交感神经活性失衡^[12]。神经系统和生物免疫的关系一直是免疫学和神经科学学者研究的内容。近年来,研究学者们调查了不同神经免疫通讯的生物学机制,结果清晰地表明神经系统能够控制免疫反应^[13,14]。而神经系统与免疫系统在生物免疫上是相互协同作用的^[15]。本文提出了针对模糊红外目标图像边带模糊区域细分割的最优神经免疫可免域,并设计了模糊红外目标图像提取算法的神经网络与免疫网络的协同作用方法。

结合容错域理论和生物免疫作用范围机理,根据免疫因子对抗原特征空间的作用范围机理,将能被生物免疫系统识别的抗原特征空间定义免疫可免域。而对于某个免疫因子所识别的可免域,如果该可免域对应的抗原识别平面能够垂直平分可免域中的抗原与非可免域的

其他抗原所表示的特征球连接线段,则称该可免域为最优神经免疫可免域。

算法借鉴生物免疫中神经系统对免疫系统的调节作用,在模糊边带区域的划分过程中引入神经网络提供的模板匹配信息,用以表示神经系统的促进或抑制免疫的效果。假设 β 为促进或抑制免疫的参数,所提取的目标区域特征与背景区域特征为 g_1 和 g_2 。经反复实践验证,用于划分边带模糊的待测区域的最优神经免疫可免域的表达式为

$$NI = \sqrt{g_1^2 + g_2^2} + \beta/2 \quad (2)$$

3 实验结果与分析

3.1 边带模糊红外图像目标提取评价规则

对于边带模糊红外图像的目标提取算法,目前其提取准确性及可靠性的评价指标尚未有明确的方式。因此,本文采用真阳率(True Positive Rate, TPR)和 Jaccard 相似性指数 $J_{(P,T)}$ 作为评价手印目标提取结果的定量度量指标,验证本文提出的算法对模糊红外手印图像分割的准确性。

TPR 作为一种常用的目标图像提取评价指标,通过统计实际分割结果与参考图像结果的重合像素点数量,计算其与参考目标的像素点数的比例,从而体现真实目标提取的准确性。TPR 越高,说明提取效果越好。假设实际分割结果的目标区域为 P,参考分割图像的目标区域为 T,则 TPR 的表达式为

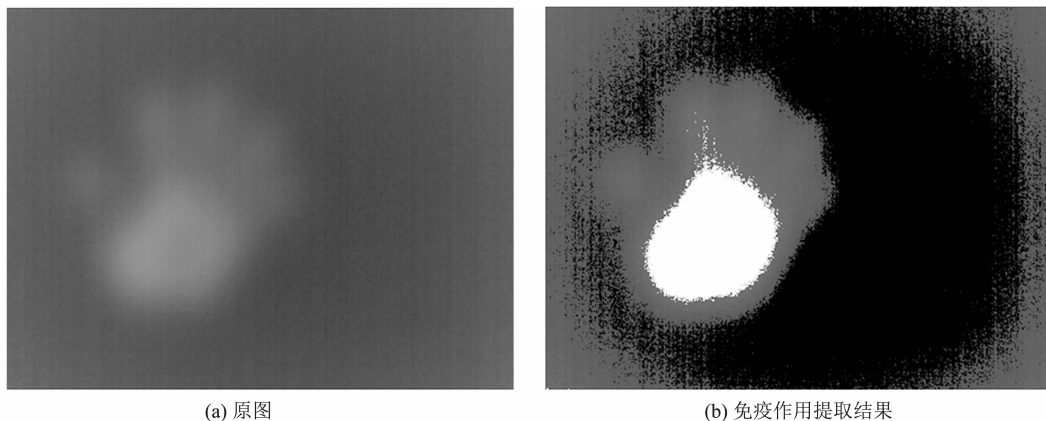


图 5 免疫网络作用过程及效果

$$TPR = \frac{|T \cap P|}{|T|} \times 100\% \quad (3)$$

$J_{(P,T)}$ 是实际提取结果中的目标与参考图像中的目标的交集与并集的比率, 代表实际提取结果中的目标和参考图像中的目标重合度。 $J_{(P,T)}$ 越接近 1, 说明提取效果越好, 其公式可表达为

$$J_{(P,T)} = \frac{|P \cap T|}{|P \cup T|} \times 100\% \quad (4)$$

3.2 实验结果分析

为了验证提出的最优可免域神经免疫网络边带模糊红外目标提取算法的有效性和准确性,

我们利用 TIX 红外摄像机采集并建立红外手印图像数据集。为了验证算法的效果, 我们选择了 3 幅在案发后 4 min 时采集的来源于不同手印对象的模糊红外手印痕迹图像。

本节通过比较 5 种不同算法对模糊红外手印图像的提取效果来验证利用本文提出的算法提取目标的准确性。5 种算法分别为最大类间方差算法、最大熵阈值算法、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 和分水岭算法和本文提出的最优可免域神经网络提取算法 (F_NI), 实验结果如图 6 所示。

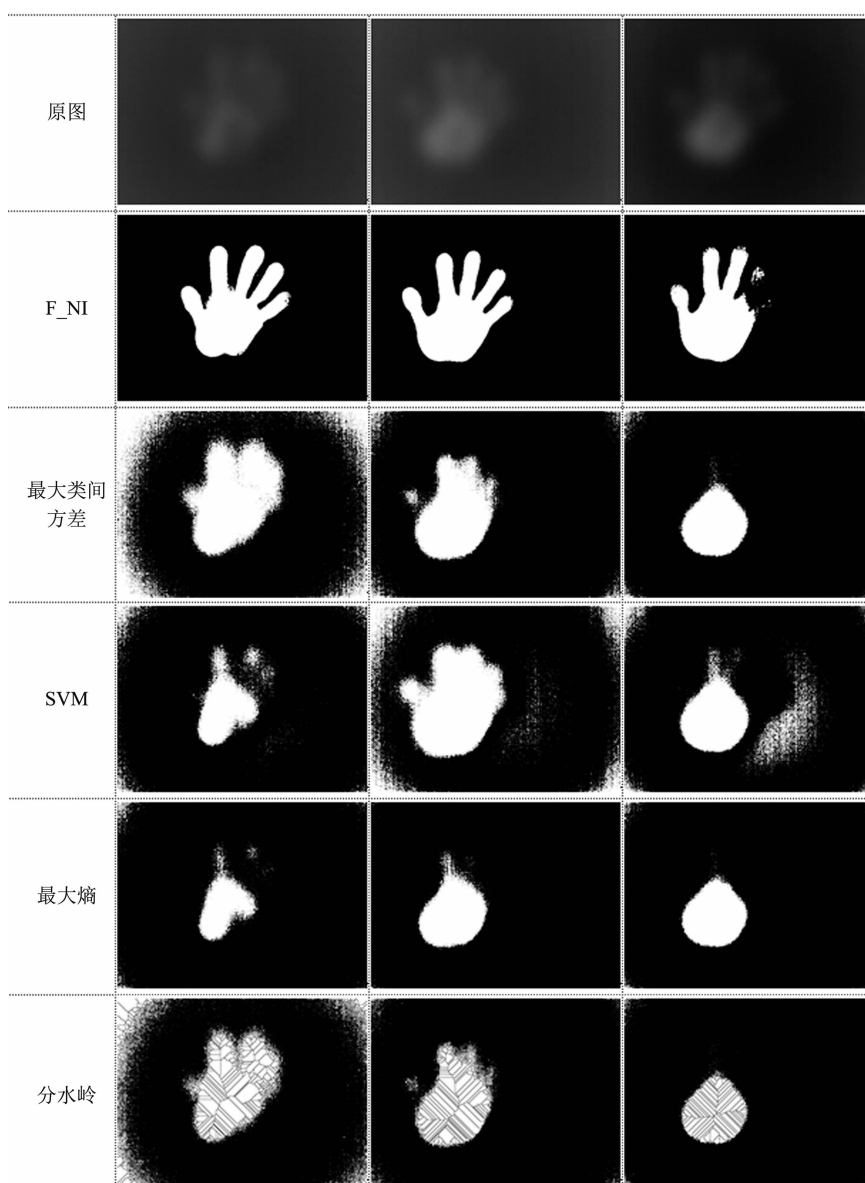


图 6 5 种算法的目标提取结果

从结果图中能够发现,与其他算法相比,利用最大熵阈值算法提取的目标区域总体较少。利用最大类间方差算法和分水岭算法能够提取目标的大部分区域,但是这两个算法对背景的误提取区域较多,并且无法有效辨识出轮廓。与大熵阈值算法、最大类间方差算法和分水岭算法相比,SVM 根据训练集的不同,目标提取结果的波动较大,尽管能有效分割出目标的轮廓,但伴随的噪声提取也较严重。相比之下,本文提出的算法能够较完整地提取出目标的轮廓,尽管部分图像特征依旧存在不足,但与其他算法在同一幅图上的提取效果相比,本文算法的优势是明显的。

3.3 评价规则的定量分析

根据选取的评价规则对实验结果进行定量分析,TPR 和 Jaccard 相似性指标的评价结果见表 1。SVM 的 TPR 波动较明显,不同图像的 TPR 结果有较大的差异。其他算法的 TPR 数值总体上一般,而本文提出的算法 TPR 明显高于其他算法。关于 Jaccard 相似性指数,类间方差法、最大熵法、SVM 和分水岭法这 4 种比较算法的相似性指数均在 0.5 左右,说明目标提取的结果明显小于标准图像或存在较多误选区域。本文提出的算法的相似性指数最高可达 99.7%,最低也达到 85.6%,远高于其他算法,说明本文提出的算法与参考图像的相似性较高。

表 1 5 种提取算法的定量分析

图像	指标	OINI	OTSU	最大熵	SVM	分水岭
1	TPR	0.9951	0.8969	0.3589	0.4849	0.7105
	Jaccard	0.9866	0.4220	0.3469	0.4327	0.4348
2	TPR	0.9970	0.7911	0.5509	0.9364	0.6133
	Jaccard	0.9970	0.6694	0.5427	0.5374	0.5603
3	TPR	0.8558	0.5051	0.4830	0.5656	0.3970
	Jaccard	0.8558	0.4877	0.4738	0.4309	0.3913

4 总结

深度模糊的红外目标图像是一类特殊的红外图像类型,其非线性模糊的边带区域加大了目标提取难度。本文针对这一问题,基于生物免疫的优异特性提出了一种最优可免域神经免疫网络深度模糊红外目标提取算法。将生物免疫中神经系统与免疫系统相互作用的特点与红外目标提取相结合,设计了最优可免域神经免疫网络和针对边带模糊红外图像的处理方法。通过实验验证了最优可免域神经免疫网络提取算法对边带模糊的红外目标图像提取的有效性和准确性。

参考文献

- [1] Rodet F, Tasiemski A, Boidin-wichlacz C, et al. Hm-MyD88 and Hm-SARM: Two Key Regulators of the Neuroimmune System and Neural Re-

pair in the Medicinal Leech [J/OL]. Scientific Reports, 2015, 5 [2015-0416]. <https://www.nature.com/articles/srep09624>.

- [2] Yu X. Fuzzy Infrared Image Segmentation Based on Multilayer Immune Clustering Neural Network [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, **140**:959-963.
- [3] Fu D, Yu X, Tong H. Target Extraction of Blurred Infrared Image with an Immune Network Template Algorithm [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, **56**(1):102-106.
- [4] 许茗,于晓升,陈东岳,等. 复杂热红外监控场景下行人检测 [J]. *中国图象图形学报*, 2018, **23**(12):1829-1837.
- [5] 荣楚君,曹晓光,白相志. Facet 方向导数特征与稀疏表示相结合的红外弱小目标检测算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2018, **23**(11):1768-1776.
- [6] 杨焘,付冬梅. 流形正则化多核模型的模糊红外目标提取 [J]. *北京科技大学学报*, 2016, **38**

- (6):876–885.
- [7] Li S, Ma J. A Kernel Fuzzy Clustering Infrared Image Segmentation Algorithm Based on Histogram and Spatial Restraint [C]. International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2017.
- [8] 刘敏, 李智彪. 基于粒子群优化脉冲耦合神经网络的红外图像分割 [J]. 激光杂志, 2016, 37(2):50–53.
- [9] Bai X, Wang Y, Liu H, et al. Symmetry Information Based Fuzzy Clustering for Infrared Pedestrian Segmentation [C]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 1946–1959.
- [10] Lin W, Chu Y W. Biological Characteristics and Optical Imaging Research of Immunological Synapse Formation [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2017, 44(12):1066–1073.
- [11] Obaid A, Naz A, Ikram A, et al. Model of the Adaptive Immune Response System Against HCV Infection Reveals Potential Immunomodulatory Agents for Combination Therapy [J/OL]. Scientific Reports, 2018, 8 [2018-07-11]. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-27163-0>.
- [12] Ribeiro-da-Silva M, Vasconcelos D M, Alencastre I S, et al. Interplay between Sympathetic Nervous System and Inflammation in Aseptic Loosening of Hip Joint Replacement [J/OL]. Scientific Reports, 2018, 10 [2018-10-30]. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-33360-8>.
- [13] Pavlov V A, Tracey K J. Neural Regulation of Immunity: Molecular Mechanisms and Clinical Translation [J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(2):156–166.
- [14] Pavlov V A, Tracey K J. Neural Regulators of Innate Immune Responses and Inflammation [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 2004, 61(18):2322–2331.
- [15] Sébastien, Foster S L, Woolf C J. Neuroimmunity: Physiology and Pathology [J]. *Annual Review of Immunology*, 2016, 34(1):421–447.

(上接第 6 页)

本项目作为一部分成果, 获评中国科学院上海技术物理研究所 2016 年度重要科技进步和中国科学院 2017 年度杰出科技成就奖——“新一代星载高精度大气探测光学载荷技术研究集体”。相应研究成果获得了 4 项实用新型专利授权^[1–4], 并在 2017 年 10 月 APOLO 和 2018 年 3 月 GSICS 等国际会议上得到了发表^[5–6]。

附注: 中国科学院上海技术物理研究所研制团队的成员包括殷德奎、顾明剑、王培纲、宋晓伟、陆靖靓、李玥、梁科锋、沈人才、王模昌、吴航行、张韬、李笑、黄怡等人以及负责光学薄膜研制工作的刘定权、李大琪、于天燕等人。应用单位的参加人员主要有蒋兴安、林龙福、韩志刚、赵增亮等人。

参考文献

- [1] 殷德奎, 王培纲, 顾明剑, 等. 一种偏振辐射定标装置: 201720063479.2 [P]. 2017-08-15.
- [2] 梁科锋, 殷德奎, 王培纲, 等. 高精度多光谱偏振滤光轮: 201720061427.1 [P]. 2017-08-15.
- [3] 王培纲, 梁科锋, 殷德奎, 等. 一种多偏振片装校装置: 201720061374.3 [P]. 2017-08-15.
- [4] 王培纲, 宋晓伟, 周文彩, 等. 适用于空间环境的超广角望远镜: 201720061433.7 [P]. 2017-08-15.
- [5] Yin D K. The TG-2 Multi-Viewing Polarimetry Imager [C]. Hefei: 1st International Workshop on Advancement of POLarimetric Observations, 2017.
- [6] Yin D K. TG-2 Multi-Angle Polarization Imager Calibration and Evaluation [C]. Shanghai: GSICS 2018 Annual Meeting, 2018.