文章编号：1672-8785(2023)10-0043-07

轻量级红外刑侦图像目标识别算法

于　晓　许靖寓

（天津理工大学电气工程与自动化学院，天津　300384）

摘　要：红外刑侦图像目标识别对刑事侦查具有重要意义，但刑事案件的侦破对时间和置信度要求较高。设计一种保持优异识别精度且具备较快识别速度的轻量级红外刑侦图像目标识别算法，具有十分重要的研究价值。因此借鉴生物免疫的优良特性，设计了免疫原性深度神经网络算法。该算法通过构建先天性免疫网络和适应性免疫网络来提取图像特征，然后设置免疫原性网络增强算法在处理图像特征映射时对不同通道之间优先级的调整能力，从而提高算法的精度和速度。实验结果表明，本文算法有效实现了红外刑侦图像的快速精准识别。与 VGG16、VGG19、Resnet34、Resnet50、MobilenetV2 等模型相比，本文算法不仅取得了 99.4%的最高测试准确率，而且还具备最快的识别速度。

关键词：红外图像；刑侦图像；图像识别；轻量级网络

中图分类号：TP18　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2023.10.006

Lightweight Target Recognition Algorithm for Infrared Criminal Investigation Images

YU Xiao，XU Jing-yu

(*School of Electrical Engineering and Automation*, *Tianjin University of Technology*, *Tianjin 300384*, *China*)

Abstract: Infrared image target recognition is of great significance to criminal investigation, but the resolution of criminal cases demands high requirements in terms of time and confidence coefficient. It is of great research value to design a lightweight target recognition algorithm of infrared criminal detection image to maintain excellent recognition accuracy and high recognition speed at the same time. Therefore, the excellent characteristic of biological immunity is drawn on and the immunogenic deep neural network algorithm is designed. The algorithm constructs innate immune network and adaptive immune network to extract image features. Then an immunogenic network enhancement algorithm is implemented to adjust the priority between different channels when processing image feature mapping, so as to improve the accuracy and speed of the algorithm. Experiments show that the proposed algorithm can effectively realize the fast and accurate recognition of infrared criminal detection images. When compared with VGG16, VGG19, Resnet34, Resnet50, MobilenetV2 and other models, the proposed algorithm not only achieves the highest test accuracy of 99.4%, but also has the

收稿日期：2023-06-01

基金项目：天津理工大学教学基金项目(YB20-05)；国家自然科学基金项目(61502340)；天津市自然科学基金项目(18JCQNJC01000)；天津市教委科研计划项目(2018KJ133)

作者简介：于晓(1985-)，男，山东临沂人，副教授，博士，主要从事人工智能和图像处理方面的研究。E-mail：yx_tjut@163.com

fastest recognition speed.

Key words: infrared image; criminal investigation image; image recognition; lightweight network

0 引言

随着科学技术的迅猛发展和犯罪分子反侦查意识的不断提高，刑事侦查面临着更加严峻的挑战。一方面，新型犯罪手段不断涌现，犯罪方式变得越来越智能化，导致刑事案件日益复杂；另一方面，犯罪分子也开始有意识地销毁犯罪证据、抹消犯罪痕迹，给案件侦破带来极大的困难。在这种情况下，掌握一种不易受到对抗和预防的方法来协助刑事侦查是极其重要的。

红外成像技术是一种将不可见热辐射转换为可见热像图的方法，能够显示可见光下无法显示的目标信息，可用来检测残留的温度痕迹。依靠该特点，尝试通过捕获犯罪现场嫌疑人遗留的热痕迹来识别犯罪者身份信息是一项新颖的侦查手段。犯罪现场的手部热痕迹是嫌疑人在现场接触物体所残留的热痕迹信息之一。由于这种信息是人手与物体接触时的热传递遗留下来的，因此嫌疑人无法通过手套等手段进行对抗，也无法在犯罪时有意识地进行痕迹破坏。采用红外成像技术捕获犯罪现场嫌疑人遗留的手部热痕迹，并利用机器学习方法对热痕迹进行信息分析，能够推断出嫌疑人的体貌特征、作案时间等信息，甚至可以直接识别出嫌疑人的身份。图 1 为红外手部热痕迹图像。

热痕迹不易对抗和预防，使得红外热痕迹目标识别成为刑侦领域中非常有潜力的一种方法。然而，由于热扩散现象的存在，红外痕迹会随着时间的流逝而趋于模糊。如何有效提取和表达热痕迹中的模糊特性，是红外刑侦图像热痕迹目标识别领域的一大难题。当前，针对模糊图像目标识别问题的研究大多集中于散焦模糊[1]、运动模糊[2]、散焦与运动混合模糊[3]等，与本文所研究的红外模糊成因、红外模糊特性等方面均不同。因此，这些方法在红外模糊图像识别任务中难以展现出良好的性能。

除了模糊难题需要解决以外，如何在确保识别准确率的前提下提高识别速度是该领域的另一大难题。这是由刑侦工作的性质决定的。由于需要快速且准确地侦破刑事案件，因此对时间和置信度的要求比较高。在现有的方法中，传统方法主要依赖于人工设计的低层次特征和启发式的先验假设，往往缺失高层次的语

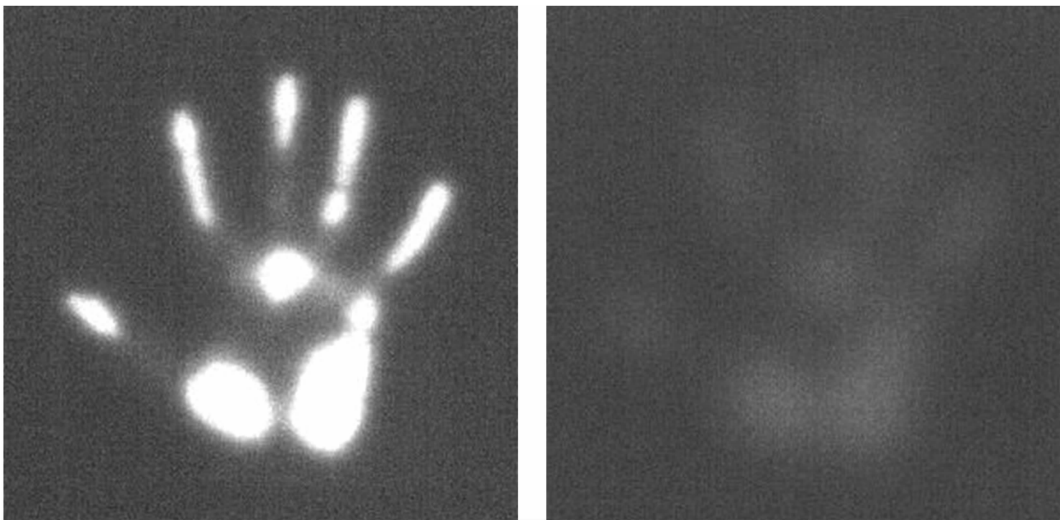

图 1 红外手部热痕迹图像

义信息，导致精度受限制。而对于基于深度学习的方法，良好的精度通常依赖于更大的网络体积和庞大的计算负荷。这样会使模型在刑侦这种时间紧急且资源受限的应用场景中使用价值更低。设计轻量级的识别算法无疑是上述问题的一个解决方案。国内外许多学者也在轻量级识别算法方面取得了很多有价值的成果。然而，由于轻量级的网络往往具有较简洁的结构和较浅的深度，这些算法在多尺度特征的表达上性能较差，难以应对红外热痕迹目标的模糊问题。因此，这些方法也无法直接用于红外刑侦图像目标识别任务。

基于上述分析，红外刑侦图像热痕迹目标识别的关键在于如何在有限的参数量下提取到能表达红外模糊图像目标信息的有效特征，以解决红外模糊问题及算法笨重问题，进而实现目标的快速准确识别。生物免疫系统在抗原识别中表现出认知、调节、学习等优异特性，启发了本文对于红外刑侦图像目标识别算法的研究思路。因此，本文基于红外手部热痕迹的模糊特性和刑侦工作的实际需求，借鉴生物免疫的优良特性设计了一种轻量级红外刑侦图像目标识别算法，即免疫原性深度神经网络算法。该算法能在轻量级的条件下有效学习到图像中的强免疫原性特征信息，克服红外模糊的影响，从而实现目标的高效识别。

1 相关工作

1.1 模糊图像识别

模糊图像识别一直以来都是计算机视觉领域的一个重要研究方向。国内外学者对此开展了许多深入的研究，大量的方法被提出。Yu Y[4]提出了一种基于图神经网络的步态特征识别新方法，克服了人体运动环境对模糊图像识别过程的影响；Choi J 等人[5]提出的一种通过用改进的去模糊生成对抗网络恢复运动模糊的手指静脉图像来提高识别性能的新方法，具有良好的识别性能；Chen W 等人[6]提出了一种模糊修复网络模型，并建立了多尺度细节对比度增强算法，最后提出了一种基于深度学习的低对比度缺陷识别方法，取得了较高的识别精度；Mao Q H 等人[7]提出的一种改进 YOLOv5 算法的图像识别方法具有除雾和去模糊功能，有效减小了高速运行条件下对图像的模糊影响；Jayavel A 等人[8]开发了一种去模糊方法，显著提高了广泛使用的深度卷积神经网络在图像分类中的性能。上述各类研究均取得了有特色的成果，启发了新型模糊图像识别算法的研究思路。

以上研究多集中于散焦模糊、运动模糊、散焦与运动混合模糊等模糊类型。这些都是最显著和最常见的影响图像质量的模糊类型，涵盖了大多数实际场景中的模糊情况，因此对其进行研究具有比较重要的实际应用价值。然而，红外热痕迹目标识别任务所面临的红外模糊与这些模糊类型并不相同，即具有不同的模糊成因和模糊特性。红外热痕迹随着时间的流逝一直受到热扩散现象的作用，且所处环境的温度、湿度、循环气流以及被接触物体的材质均会对模糊程度产生不同的影响。这种复杂的模糊成因使得红外模糊的规律难以获取且模糊程度较深。因此，已有的模糊图像识别算法很难有效应对红外热痕迹识别问题。

1.2 轻量级图像识别算法

随着深度学习在图像识别等领域的广泛应用，深度学习模型的规模不断增大，模型参数数量和计算需求也呈指数级增长。但是，大规模的模型在实际应用中往往需要高性能的计算硬件支持，而这种硬件资源并不是所有的应用场景都能够提供的。红外热痕迹目标识别任务也面临着该问题。由于刑侦独特的工作性质，案件的侦破通常对时间和置信度有很高的要求，因此希望模型能够在较短的时间内给出精确的识别结果。此外，如果模型足够轻量化，红外刑侦图像目标识别移动设备的开发将更大程度地提高刑事侦查的工作效率。

为了让深度学习方法能够在资源受限的场景中也能高效应用，国内外学者对轻量级深度学习模型开展了许多研究。Zhou G Y 等人[9]

提出一种轻量级特征提取块，并将其用于合成孔径雷达自动目标识别和检测，能够以较少的参数提取精细稳定的特征；Chen P 等人[10]提出的一种基于注意力机制的轻量级识别方法，在识别精度和速度上具有较好的表现；Liang X R 等人[11]提出的一种基于改进的 MobileNetV3 的轻量级网络，比大多数最先进的网络更轻；Cao Z G 等人[12]提出的一种基于 Yolov5s 的轻量级煤矸石识别算法，具有不错的性能；Li D 等人[13]将一种新的轻量级并行八度卷积神经网络用于高光谱图像分类，在小样本情况下取得了较好的表现。上述研究均取得了有价值的成果，为模型轻量化提供了有意义的思路。然而，上述方法在实现轻量化的同时，模型的性能和泛化能力均在一定程度上受到了影响。因此，这些方法难以应对红外热痕迹目标的模糊问题，无法满足刑侦任务的实际需求。

2 免疫原性深度神经网络算法

实际的红外刑侦图像目标识别任务对识别算法有以下要求：克服红外刑侦图像模糊规律难以获取且模糊程度较深等特性的影响，提取到能表达红外模糊图像目标信息的有效特征；实现对红外刑侦图像目标的快速准确识别。这些要求与生物免疫功能十分吻合。医学和生物学研究表明，生物免疫在抗原分类、识别上表现出认知、调节、学习等目前复杂系统优化决策策略所缺乏的优异特性。这恰好可以满足此类识别任务对有效特征提取、快速精准识别等功能的设计需求，为红外刑侦图像目标识别算法的研究提供了思路。因此，本项目将借鉴、拓展生物免疫机理，设计免疫原性深度神经网络算法，并将其用于红外刑侦图像目标识别。免疫原性深度神经网络模型结构如图 2 所示。

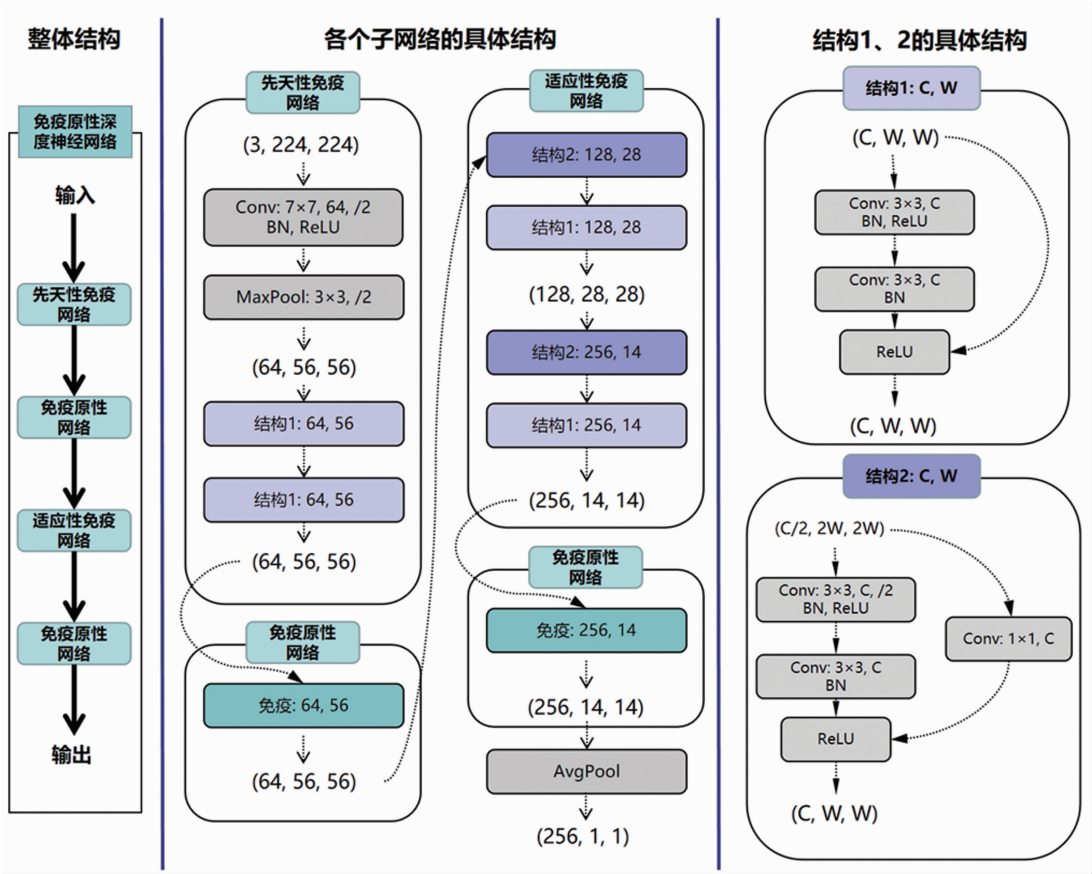

图 2 免疫原性深度神经网络模型结构

图 2 可以划分为左、中、右三个部分。其中，最左侧是免疫原性深度神经网络的整体结构，中间部分是免疫原性深度神经网络的具体结构，最右侧是免疫原性深度神经网络中结构 1 与结构 2 的具体结构。免疫原性网络由于结构较为复杂，将在后面作详细介绍。

在训练阶段，红外刑侦图像输入后，先经过先天性免疫网络进行处理，得到先天性特征映射，然后通过免疫原性网络记录先天性特征映射不同部分的免疫原性。接着将处理后的特征映射送入适应性免疫网络中进行深度处理，得到适应性特征映射，再通过免疫原性网络记录适应性特征映射不同部分的免疫原性。最终，模型将根据训练集中不同类别的数据样本，提取到能有效表达红外刑侦图像类别信息的特征。在测试阶段，红外刑侦图像输入后，分别被先天性免疫网络和适应性免疫网络提取对应的特征映射；按照免疫原性网络中记录的数据进行关注度分配，最终得出识别结果。

2.1　先天性免疫网络

在生物免疫中，先天性免疫是免疫系统的第一道防线，是生物体自身具备的一种防御机制。先天性免疫不需要事先接触到特定病原体，也不依赖于记忆机制。它通过一系列固有的生物学特征来快速、广泛地识别和消灭入侵的病原体，从而维护机体的健康[14]。

先天性免疫的主要组成部分包括物理屏障、化学防御和细胞免疫。其中，细胞免疫是先天性免疫系统中的重要组成部分，涉及多种免疫细胞。这些细胞起着识别、吞噬和杀伤病原体的关键作用，同时调节和协调免疫反应。先天性免疫细胞能够快速识别和消灭一部分病原体。但由于其依赖特定受体来辨识病原体，存在一些病原体无法被识别的情况。对于这些病原菌和病毒等，先天性免疫中的抗原递呈细胞会将抗原分子降解并加工成一定大小的多肽。多肽与主要组织相容性复合体(Major Histocompatibility Complex，MHC)分子结合，形成抗原肽-MHC 复合物，并展示在抗原递呈细胞的表面，供适应性免疫细胞识别使用。这样的机制允许先天性免疫与适应性免疫相互配合，以提高对病原体的全面抵抗能力。

本文受到生物免疫中先天性免疫优良特性的启发，设计先天性免疫网络并将其用于提取红外刑侦图像的浅层特征(即先天性特征映射)。将输入图像看作是抗原，首先设置一个 7×7 卷积层将抗原吞噬，捕获抗原的基本信息；然后采用 3×3 尺寸的最大池化层对抗原中的无关信息进行清除，防止冗余信息过多产生过拟合；最后设置两层结构 1，对摄入抗原进行加工，将抗原降解为若干个易处理的抗原肽，并合成抗原肽-MHC 复合物，供适应性免疫网络处理。结构 1 中包含两个 3×3 尺寸的卷积层和一个跳跃连接。其中，跳跃连接的作用是保留抗原的原始信息，从而增强后续网络对抗原的识别能力。结构 1 的公式如下：

$$y = f(x) + x \tag{1}$$

式中，x 表示结构 1 的输入；y 表示结构 1 的输出；$f(x)$表示两个 3×3 卷积层作用后的结果。

2.2　适应性免疫网络

适应性免疫在先天性免疫的基础上发挥作用，具有高度特异性和记忆性，能够识别并针对特定的抗原产生免疫应答[15]。适应性免疫的过程涉及 T 细胞和 B 细胞。它们通过特异性受体识别抗原，并经过活化、分化和增殖，产生效应细胞和记忆细胞。效应细胞直接杀伤感染细胞或中和病原体，而记忆细胞在再次遇到相同抗原时能够快速启动免疫应答，提供长期的免疫保护。先天性免疫和适应性免疫之间存在密切的相互作用。先天性免疫通过炎症反应和趋化因子的释放，吸引和激活适应性免疫细胞。适应性免疫则可调节先天性免疫的反应，增强炎症反应和抗微生物活性，进一步协调整个免疫系统的功能。先天性免疫和适应性免疫之间的相互作用是紧密而复杂的。它们相互配合，协同工作，以提供全面的免疫保护，从而保障生物体免受感染和疾病的侵害。

适应性免疫的功能以及先天性免疫与适应性免疫之间的协作机制，给本文识别算法的设计提供了很好的思路。因此，本文构建了适应性免疫网络，并将其用于提取红外刑侦图像的深层特征(即适应性特征映射)。在先天性特征映射输入后，首先设置结构 2 对其进行更深层次的加工，然后接入结构 1 中进行同纬度加工，使特征信息更容易被适应性免疫细胞识别；接着通过一层结构 2 进行深层加工，使抗原的特征信息进一步降解，从而使网络提取到的特征信息更细致，进而充分表达红外刑侦图像不同类别间的有效信息；再经过一层结构 1 进行同纬度加工，使特征信息转换为容易被适应性免疫细胞识别的信息，最终得到适应性特征映射。

在适应性免疫网络的运行过程中，结构 2 起到非常重要的作用。在结构 2 中设置了更多的适应性因子，从而将抗原信息从一个较低维扩展到更高维。这种加工方式虽然在深度层面上增加了抗原信息的数量，但是却使得每个深度上的信息被降解加工成更细致的信息。这些更细致的信息在后续网络的处理中更容易被组合成可有效表达红外刑侦图像目标特性的综合特征。结构 2 的公式如下：

$$s = f(t) + g(t) \tag{2}$$

式中，t 表示结构 2 的输入；s 表示结构 2 的输出；$f(t)$表示两个 3×3 卷积层作用后的结果；$g(t)$是跳跃连接中设置的一个 1×1 卷积层，用于将输入升高到与输出相同的维度。

2.3 免疫原性网络

在生物免疫中，免疫原性是指抗原能够刺激免疫系统产生免疫应答的特性。它决定了抗原是否能够引起免疫反应以及免疫反应的强度和持久性[16]。抗原的免疫原性受多种因素的影响，包括抗原分子的理化性质、宿主的特性、抗原进入机体的方式和途径、免疫系统的功能和反应性以及环境因素等[17]。

免疫原性机理启发了本文对轻量级红外刑侦图像目标识别算法的研究思路。如果网络在处理图像时能有效处理各通道携带的数据信息，获得不同通道的免疫原性，并根据免疫原性的强度再作用到原始的特征映射上，那么网络在识别新样本数据时就能根据免疫原性调整网络作用的优先级，从而增强模型识别的准确率和速度。本文基于免疫原性思想，设计免疫原性网络并将其用于免疫原性深度神经网络算法。免疫原性网络的具体结构如图 3 所示。

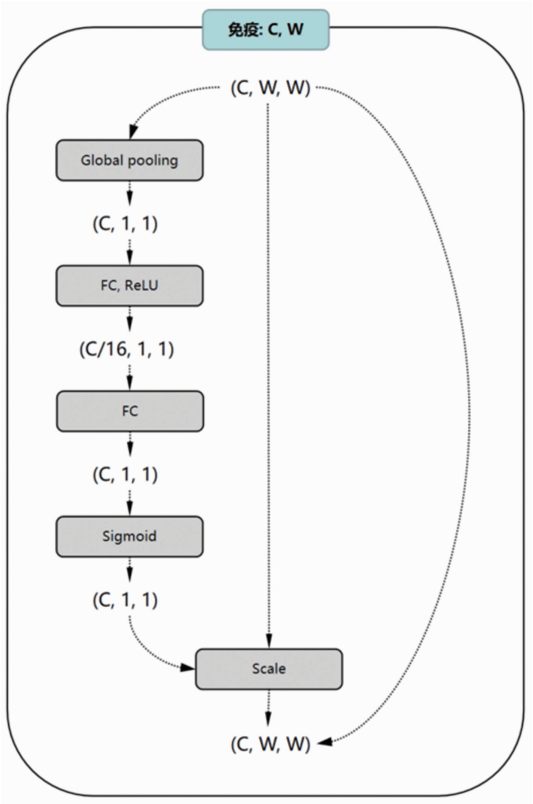

图 3 免疫原性网络结构图

免疫原性网络的作用从整体上来说可分为两部分：首先需要获得原始特征映射中各通道的免疫原性，然后将得到的免疫原性再作用到原始特征映射中。

在免疫原性获取阶段，原始特征映射的维度为(C, W, W)，采用全局池化将其压缩为$(C, 1, 1)$，相当于保留通道维度不变，在高宽维度上将特征映射压缩成一维。此一维参数将获得之前高宽维度上的全局视野，感受野更大。它被称为免疫原性，其获取方法为

$$z_c = \frac{1}{W \times W} \sum_{i=1}^{W} \sum_{j=1}^{W} u_c(i,j),\ z \in [1,C] \tag{3}$$

式中，u_c 表示第 C 个通道上的原始特征映射；z_c 表示第 C 个通道的免疫原性。

在免疫原性再作用阶段，获得原始特征映射各通道的免疫原性之后，需要利用免疫原性抓取各通道间的关系。通道间关系的抓取方式需要具备更多的非线性，从而更好地拟合通道间复杂的相关性；同时还应具备多通道特征。因此，首先在全局池化层后设置两个全连接层来建模通道间的相关性。将特征维度降低到输入的 1/16，以减少网络参数量和计算量；然后经过 *ReLU* 激活，再通过第二个全连接层还原回原始维度；接着采用 *Sigmoid* 将免疫原性转换为 0～1 之间归一化的权重，最后将该权重加权到每个通道的特征上。该过程的公式如下：

$$\tilde{u}_c = \sigma(W_2 ReLU(W_1 z))_c \cdot u_c \tag{4}$$

式中，W_1 表示第一个全连接层的降维作用；*ReLU* 表示 *ReLU* 激活作用；W_2 表示第二个全连接层的升维作用；$\sigma()$ 表示 *Sigmoid* 将免疫原性转换为归一化权重；$\tilde{u}_c$ 表示将免疫原性再作用到原始特征映射后的结果。

从图 2 中可以看出，免疫原性网络分别被设置在先天性免疫网络和适应性免疫网络之后。这样的设置方式可以记录红外刑侦图像分别经过先天性免疫作用和适应性免疫作用后的免疫原性，从而增强网络在处理图像特征映射时对不同通道之间优先级的调整能力、降低免疫原性的偶然性，进而提高算法性能。

3 实验结果与分析

3.1 数据集

本文所构建的数据集通过 Fluke Tix640 红外热像仪拍摄得到，共包含 5752 张红外手部热痕迹图像。图像尺寸均为 240×240 像素，但在实验中将被随机裁剪为 224×224 像素。表 1 列出了数据样本的具体分布情况。

表 1 红外手部热痕迹数据集分布

类别序号	训练集数量	测试集数量	总计
1	861	147	1008
2	878	164	1042
3	845	131	976
4	781	137	918
5	690	116	806
6	858	144	1002
总计	4913	839	5752

数据集中包含 6 类身份信息，分别通过对 6 名不同的受试人员进行采集得到。采集内容包含 4 种手部热痕迹类型及其变化信息。其中，4 种手部热痕迹类型分别为左手张开、左手并拢、右手张开和右手并拢。由于红外热痕迹会受到热扩散的影响而逐渐趋向于模糊，但克服模糊问题实现精准识别又是本文的重要内容，因此在对每一个受试人员的任意一种类型的手部热痕迹进行采集时，两次拍摄时间间隔约为 5 s，直至热痕迹在红外热像仪中完全不可见。此外，从表 1 中可以看出，不同类别的数据样本数量并不完全相同。这是由于在采集时受试人员手部温度、与采集区域的接触时长、外界温度等因素不完全相同，导致热痕迹的存在时长也并不相同。图 4 为本文所用数据集中的部分图像。

3.2 实验配置与环境

本文实验所用到的算法程序均采用 Python 语言编写，网络结构基于 PyTorch 框架搭建。表 2 列出了本文实验所采用的电脑配置及开发环境参数。

表 2 电脑配置与开发环境参数

软硬件	配置
CPU	AMD Ryzen 7 5800H
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060
内存	16GB
固态硬盘	1024GB
软件开发环境	Pycharm、Anaconda Python3.9
操作系统	Windows10

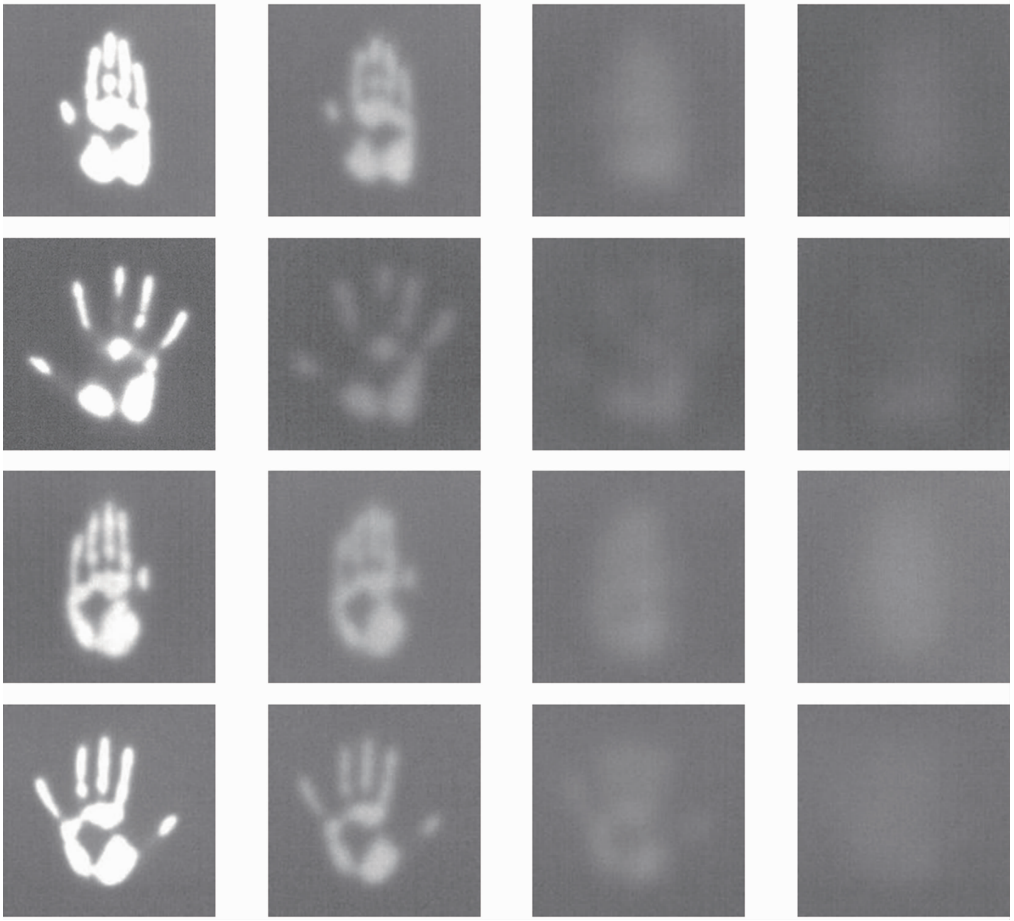

图 4 数据集中的部分图像

表 3 实验结果

算法模型	训练准确率	测试准确率	每秒训练样本数	训练时长
VGG16	0.862	0.967	66.9	8597.9 s
VGG19	0.849	0.973	55.6	10345.3 s
Resnet34	0.897	0.899	171.4	3355.9 s
Resnet50	0.880	0.847	122.7	4687.9 s
MobilenetV2	0.863	0.856	280.9	2047.7 s
本文算法	0.901	0.994	284.6	2021.1 s

3.3 实验结果分析

为了验证本文算法的有效性，本文选择 VGG16、VGG19、Resnet34、Resnet50、MobilenetV2 这五种模型作为本文实验的对比方法。实验时采用的 batch size 统一为 10，epoch 统一为 100，学习率统一为 0.0015，且统一采用随机水平翻转、裁剪等方法进行数据增强。表 3 列出了实验结果。

通过表 3 可以看出，与 VGG16、VGG19、Resnet34、Resnet50 等大网络模型相比，本文算法不仅在准确率上表现更加优异，在训练速度上也大大提升了。与以 MobilenetV2 为代表的轻量级网络相比，本文算法不仅在训练速度上有所提升，在准确率方面更是远远超过常规轻量化网络的表现。

4 结束语

本文借鉴生物免疫的优良特性，充分考虑红外刑侦图像的模糊特性和刑侦工作的实际需求，提出了免疫原性深度神经网络算法。该算法借鉴生物免疫中的先天性免疫与适应性免疫

的功能特性，分别设计先天性免疫网络和适应性免疫网络来提取图像特征。然后借鉴抗原的免疫原性机理，设计免疫原性网络并将其用于记录先天性免疫网络和适应性免疫网络中提取到的全部特征的免疫原性，从而提高网络的识别性能。具体来说，免疫原性网络能获取原始特征映射中各通道的免疫原性，抓取各通道间的关系并反作用于原始特征映射，从而增强算法在处理图像特征映射时对不同通道之间优先级的调整能力，进而提高算法的识别精度和速度。实验结果表明，本文算法在应用于红外刑侦手部热痕迹目标识别任务时，具备较高的识别准确率和较快的训练速度，可满足刑侦工作的实际需求。

参考文献

[1] Karaali A, Jung C R. Edge-Based Defocus Blur Estimation With Adaptive Scale Selection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **27**(3): 1126–1137.

[2] Karnaukhov V, Mozerov M. Motion Blur estimation Based on Multitarget Matching Model [J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(10): 100502.

[3] Kim B, Son H, Park S J, et al. Defocus and Motion Blur Detection With Deep Contextual Features [J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, **37**(7): 277–288.

[4] Yu Y. Accurate Recognition Method of Human Body Movement Blurred Image Gait Features Using Graph Neural Network [J]. *Mobile Information Systems*, 2021, **2021**(1): 1684726.

[5] Choi J, Hong J S, Owais S M, et al. Restoration of Motion Blurred Image by Modified DeblurGAN for Enhancing the Accuracies of Finger-Vein Recognition [J]. *Sensors*, 2021, **21**(14): 4635.

[6] Chen W, Zou B, Huang C Z, et at. The Defect Detection of 3D-Printed Ceramic Curved Surface Parts With Low Contrast Based on Deep Learning [J]. *Ceramics International*, 2022, **49**(2): 2881–2893.

[7] Mao Q H, Li S K, Hu X, et al. Coal Mine Belt Conveyor Foreign Objects Recognition Method of Improved YOLOv5 Algorithm with Defogging and Deblurring [J]. *Energies*, 2022, **15**(24): 9504.

[8] Jayavel A, Gopinath S, Angamuthu P P, et al. Improved Classification of Blurred Images with Deep-Learning Networks Using Lucy-Richardson-Rosen Algorithm [J]. *Photonics*, 2023, **10**(4): 396.

[9] Zhou G Y, Yu J M, Zhou S B. LSCB: A Lightweight Feature Extraction Block for SAR Automatic Target Recognition and Detection [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2023, **44**(8): 2548–2572.

[10] Chen P, Chen M F, Wang S, et al. Real-Time Defect Detection of TFT-LCD Displays Using a Lightweight Network Architecture [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, **34**(4): 2153–2170.

[11] Liang X R, Liang J F, Yin T, et al. A Lightweight Method for Face Expression Recognition Based on Improved MobileNetV3 [J]. *IET Image Processing*, 2023, **17**(8): 2375–2384.

[12] Cao Z G, Fang L, Li Z Q, et al. Lightweight Target Detection for Coal and Gangue Based on Improved Yolov5s [J]. *Processes*, 2023, **11**(4): 1268.

[13] Li D, Wu H J, Wang Y J, et al. Lightweight Parallel Octave Convolutional Neural Network for Hyperspectral Image Classification [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2023, **89**(4): 233–243.

[14] 秦魏婷，孙炳伟. 进一步重视先天性免疫系统的应用研究 [J]. **中华重症医学电子杂志(网络版)**, 2018, **4**(4): 304–306.

[15] 黄河玉，方峰. 补体在适应性免疫中的调节作用 [J]. **中国免疫学杂志**, 2016, **32**(4): 600–604.

[16] 谢彦博. 蛋白质抗原的免疫原性和特异性的分子基础 [J]. **国际生物制品学杂志**, 1979, **2**(2): 7–11.

[17] 王晨，马艳秋，张梓湘，等. 不同处理方法对蛋清蛋白免疫原性及结构的影响 [J]. **食品科学**, 2022, **43**(15): 93–100.