

文章编号：1672-8785(2023)05-0046-07

基于改进 U-Net 的刑侦红外 手印目标提取

郝朝阳 于 晓* 叶 健*

(天津理工大学, 天津 300382)

摘要：红外图像技术在刑侦领域的应用越来越广泛。通过案发现场遗留的热痕迹可为案件搜集更多的证据。但是红外图像往往存在轮廓不清晰、提取效果模糊等问题。针对这些问题提出一种基于改进 U-Net 的图像目标提取方法。网络结构采用三层的上采样和下采样：上采样采用双立方插值，下采样采用步长为 2 的 3×3 卷积。通过跳跃连接将浅层特征和深层语义信息融合，并引入 Dropout 和 Batch Normalization 结构使得网络更快、更好地收敛。以刑侦红外手印为研究对象，通过实验对比改进 U-Net、Sobel 算子、分水岭、最大熵、Otsu 等算法的图像目标提取效果。结果表明，本文搭建的 U-Net 网络能够更完整、更有效地提取红外手印的轮廓信息，在红外手印的提取上取得了较好的效果。

关键词：改进 U-Net；手印红外图像；刑侦图像分割

中图分类号：TN219 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2023.05.006

Target Extraction of Infrared Fingerprint in Criminal Investigation Based on Improved U-Net

HAO Zhao-yang, YU Xiao*, YE Jian*

(Tianjin University of Technology, Tianjin 300382, China)

Abstract: Infrared image technology is applied more and more widely in the field of criminal investigation. Heat traces left at the crime scene can be used to gather more evidence for the case. However, there are always some problems such as unclear contour and fuzzy extraction effect existing in infrared images. An image object extraction method based on improved U-Net to solve these problems is proposed in this paper. Three layers of up-sampling and down-sampling are adopted in the network structure. Double-cubic interpolation is used for up-sampling, and 3×3 convolution with step size of 2 is used for down-sampling. The shallow feature and deep semantic information are combined by skip connection. The introduction of Dropout and Batch Normalization structures makes the network converge faster and better. Taking infrared fingerprint of criminal investigation as the research object, the image object extraction effects of U-Net, Sobel operator, watershed, maximum entropy and Otsu are improved by comparing experiments. The results show that the U-Net network built in this paper can extract the contour information of infrared fingermarks more completely and effec-

收稿日期：2022-12-21

基金项目：天津理工大学大学生创新创业训练计划项目(202110060038)

作者简介：郝朝阳(2000-)，女，河北石家庄人，学士，主要研究方向为图像处理。

*通讯作者：E-mail: yx_tjut@163.com; yejian199@163.com

tively, and good results are achieved in the extraction of infrared fingermarks.

Key words: improved U-Net; fingerprint infrared image; criminal investigation image segmentation

0 引言

随着平安城市的建设，“金盾”“天网”“雪亮”等工程也在不断推进，图像的数字化分析与处理已成为案件线索发掘、证据提取的重要技术手段^[1]。基于红外成像技术处理的刑侦图片是破案过程中的一类重要物证。目前主要存在物证(如各类人的组织残留物、爆炸残留物、人造纤维组织等)的获取与鉴定问题^[2]。该技术在侦查、活体组织热成像活动方面具有较大的前景。

刑侦红外图像是利用热像仪将刑侦过程中残留的肉眼不可见的红外热量转换成的可见光图像，具有普通可见光下拍摄图像所没有的许多特点。红外手印图像在刑侦痕迹检测过程中是不可忽略的一类证据，可以避免嫌疑人戴手套、擦拭等对痕迹的破坏。而且在采集红外图像的过程中可以保护现场的完整度。红外图像也存在许多缺点以及应用中的困难，主要是由于热量慢慢消失导致红外图像具有较高的不稳定性。对于同一场景，红外图像与可见光图像有很大的区别。若受到图像模糊、背景复杂、热量等因素的影响^[3]，刑侦红外图像就会有对比度低、图像噪点多、噪声大等缺点^[4]。现场获取的刑侦红外图像往往存在图像目标轮廓不清晰、边缘模糊等问题。这也成为图像目标提取领域中新的理论难题^[5]。

近些年来，许多学者在红外图像的目标提取方面获得了很多成果。Ghaneizad M 等^[6]通过用场景中的特征信息获取的视点图像来提取距离信息，从而实现图像的目标提取。黄巍等^[7]结合 Canny 边缘检测和双阈值法，极大提高了道路边缘部分的提取效果。刘嘉文^[8]针对复杂遮挡下目标区域难以提取的问题，提出了基于光流算法和超像素分割的区域目标提取算法以及基于 ViBe 和帧差法的区域目标提取算

法。刘莉等^[9]基于改进的高帽变换，提出了一种红外图像增强与提取算法。通过引进判断值和加权系数，可以有效地提取红外小目标。向涛^[10]利用空间约束模糊 C 均值算法分割候选区域，结合目标先验知识筛选分割区域并输出目标的位置。秦立峰等^[11]将相关滤波算法应用到目标提取中，提出了一种奶牛目标提取算法。程曦等^[12]提出了一种基于形态学和聚类算法的 ROI 选取方法。他们使用差分形态滤波缩小目标范围，对可疑区域进行聚类处理以进一步缩小范围，并将其作为图像 ROI 分别进行阈值分割从而完成识别。

这些图像目标提取方法通常基于传统的机器学习方法，在红外手印图像提取中效果不佳。在深度学习网络进入快车道后，基于卷积神经网络的图像分割算法(FCN^[13]、U-Net、PSPNet 等)相继被提出。这些算法都具有泛化能力强、分割精度高的特点。郭新等^[14]针对遥感影像分割中呈现出的小尺度语义信息丢失、类别不均衡等缺陷提出了一种面向小目标提取的改进 DeepLabV3+语义分割模型。徐海祥等^[15]针对海上的水面图像信息复杂、目标难以提取到有效特征等问题，提出了一种用于水面图像目标检测的强语义特征提取结构。从计算机视觉领域看，红外手印的目标提取工作属于图像的语义分割^[16]。因此，本文尝试将快速发展的深度学习方法应用到红外手印图像的识别和提取中。基于上述问题，本文提出一种基于卷积神经网络的目标提取模型。

为达到红外手印目标提取的目的，本文在 PyTorch 1.12 框架中搭建和训练具有红外手印特征提取能力的 U-Net 模型，并通过 Dropout 和 Batch Normalization 等操作优化模型。

1 数据集

在实际的刑侦现场，犯罪嫌疑人难以观察

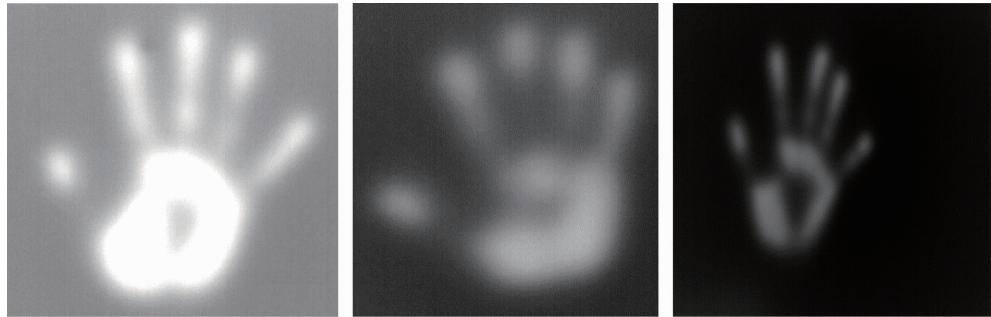


图 1 红外手印图像

到留在现场的手印痕迹。而办案时，警方则可采用红外摄像仪采集现场的手部痕迹，从而得到可见光下难以捕获的痕迹信息。通过对拍摄的手印图像进行分析，可以得到背景和整体手印目标两部分^[17]。由于热传递作用，随着时间的流逝，红外图像会越来越模糊。为了获得清晰的红外手印特征信息，本文主要研究模糊红外手印特征信息的提取。

本文实验所用数据通过 Fluke Tix640 红外热像仪拍摄得到。将手印按到墙上停留数秒后离开，以不同角度、不同残留时间对墙上的红外热量进行拍摄。本次实验共得到 418 张图片。对其进行整理和分类，最终得到 png 格式文件。通过 Labelme 包进行标注、处理生成 json 文件(即保存的分割边界坐标)，再将其转换为分割实例图像和标签图像。将这些图片分成训练集 370 张、验证集 24 张和测试集 24 张，使其构成本文的数据集。拍摄后经处理得到的 png 格式图片示例如图 1 所示。

2 基于改进 U-Net 的刑侦红外手印目标提取算法

本文选取合适的不同时间段的红外手印进行人工提取并制作带标签的训练集和验证集；通过训练结果设置合适的网络层数、激活函数、学习率等参数，搭建改进 U-Net 模型；在验证集评估训练结果并调整网络参数；最后将测试集输入到训练好的 U-Net 模型中，输出红外手印提取结果。基于 U-Net 网络的红外手印目标提取可分为数据准备(见图 2 中的蓝色流程)和网络训练与优化(见图 2 中的绿色流程)

两个部分。在得到最佳网络模型后，将测试集直接输入模型，就可以迅速获取红外手印的提取结果。本文搭建的 U-Net 网络结构如图 3 所示。

2.1 改进 U-Net 模型

U-Net 网络也属于卷积神经网络。与其他卷积神经网络不同，它没有全连接层，而采用自编码的网络结构，对输入图像进行先编码后解码的操作。这种结构也是常见的端到端的模型框架。

该网络共有 22 层：第 1 层和最后 1 层是输入层和输出层^[16]；中间包括 3 次步长为 2 的卷积、3 次双立方插值和 3 次跳跃连接；另外还有 14 次步长为 1 的卷积、Dropout 和 Batch Normalization 操作。输入的图像首先经过 2 个大小为 3 的卷积核连续卷积来提取红外手印特征。在卷积运算之前，会对特征图进行镜像填充。这样可以避免步长为 1 的卷积操作后图像尺寸减小的问题。同时扩展到 64 通道，每个卷积后都有一个 Dropout 和 Batch Normalization 操作。采用步长为 2 的卷积操作代替原 U-Net 中的最大池化进行下采样。将下采样和两次连续卷积重复 3 次。最终特征图尺寸变为原来的 1/8，通道数为 512。再经过两次卷积后，进入解码部分，共包含 3 次上采样和 6 次卷积。上采样的方式为双立方插值。对上采样过程中的特征图和下采样过程中相同尺寸大小的特征图进行拼接融合。最后通过 1×1 卷积将通道数降为 2，并输出红外手印和背景的二分类预测图^[18]。

整个模型结构高度对称。中间的跳跃连接

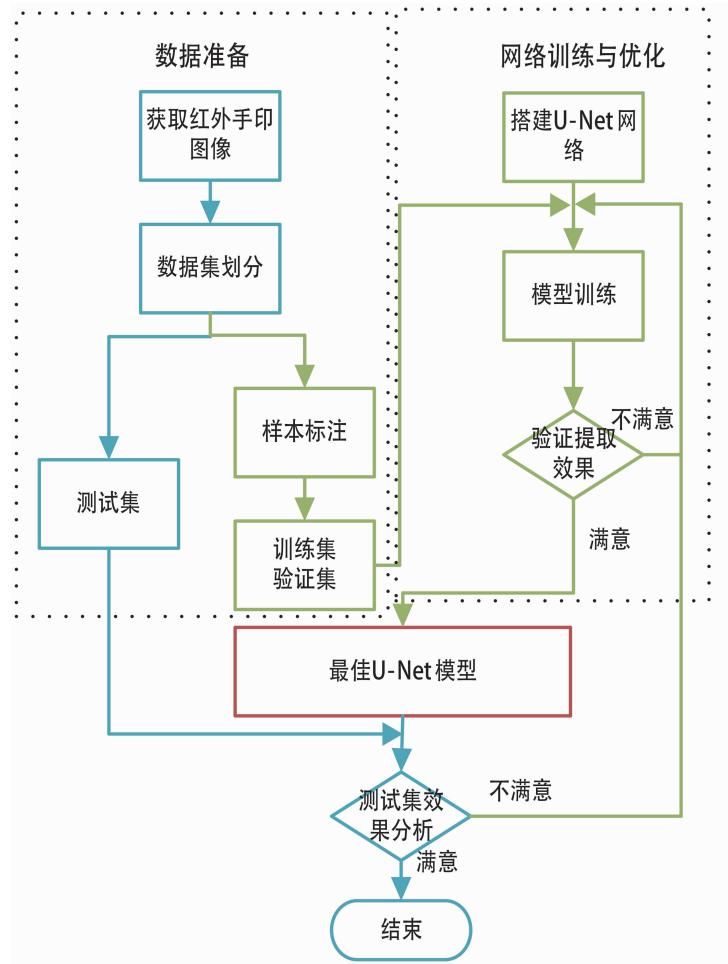


图 2 方法流程图

操作作为解码操作提供更多的参考信息，能够弥补在下采样中损失的特征信息。通过对图像四周填充图像边缘的像素点来实现镜像填充。然后将其与 3×3 的卷积核进行卷积，特征图尺寸大小不变。

为了过滤图像中的某些非重要特征信息，需要进行下采样操作。处理后图像尺寸减半，即解码部分的主要内容为卷积层特征提取和信息过滤。原始 U-Net 采用的下采样为最大池化。但是由于最大池化没有参数，直接舍弃了 $3/4$ 的像素值。经过 3 次池化后，损失了较多的有用信息，导致分割精度较差。为此本文模型引入步长为 2 的卷积操作为下采样。与最大池化相比，卷积操作的下采样具有可训练参数，可以进一步提取图像中的语义信息，有助于解码器的特征重建。使用卷积替代最大池化提高了网络对于模糊手印的提取能力。跳跃连

接操作将编码和解码结构拼接起来，对编码和解码部分中对称的特征图像进行特征堆叠。将拼接后的结果作为下一个卷积操作的输入。

模型右半部分为解码部分。本文选择双立方插值作为上采样。与下采样相反，插值是一个信息填补的过程。经过三层上采样后，图像尺寸恢复至初始值。解码部分也有相应的卷积运算操作，其作用是让模型右半部分有一定的特征信息恢复能力。插值操作只是对上一层有效信息的处理过程，不会增加有效信息，因此卷积运算操作可以充分利用上一层和跳跃连接的有效特征信息进行图像恢复。

2.2 网络优化

在网络训练过程中，为了使网络可以更快、更稳定地收敛，加入了 Dropout 和 Batch Normalization 操作。其中，Dropout 操作每次随机忽略一定比例的神经元，可防止卷积层提

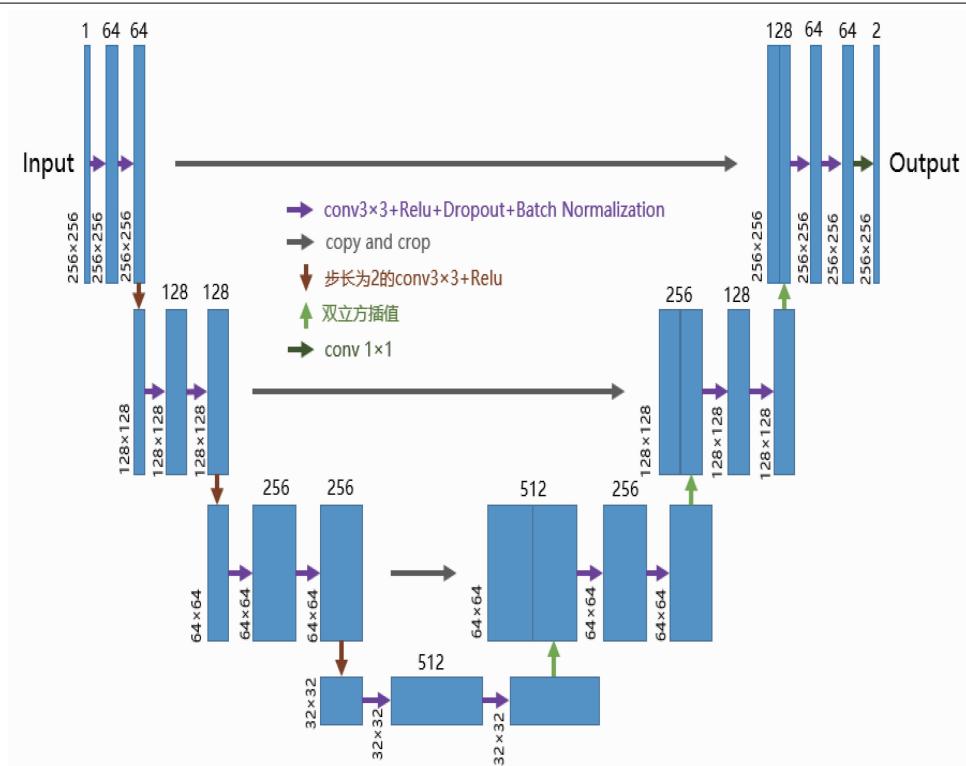


图3 U-Net 网络的结构示意图

取过多的特征信息，从而极大地减少计算量。Batch Normalization 操作往往被应用于网络模型的收敛，其具体原理如下：经归一化提取到的特征数据避免特征图的数值出现大的波动，从而保证网络的参数在小范围内稳定地进行更新。

2.3 网络训练

实验所用的系统环境为 Python3.9、Pytorch1.12 框架、Windows10 操作系统、16GB RAM、AMD Ryzen 7 5800H CPU 以及 Nvidia GeForce GTX 1650 显卡。

在网络训练中，主要有前向传播和反向传播两部分。将训练数据集送入网络中进行前向传播的运算，获取预测值和真实值之间的交叉熵损失。反向传播的损失值利用 Adam 优化算法更新网络中的训练参数。初始学习率设置为 0.001，不断迭代直至损失值达到要求。交叉熵损失函数的计算公式为

$$Loss = - \sum y \log \hat{y} + (1-y) \log(1-\hat{y}) \quad (1)$$

式中， \hat{y} 为特征图中的某个像素点被判断为手印的概率值； y 为真值。若该点为手印， $y=$

1，否则 $y=0$ 。

为了进一步提高提取精度，如果 30 轮训练后损失值不能显著减小，就利用函数将 Adam 的学习率调整为原来的一半，然后再继续训练。

3 实验结果与分析

在多次训练后，根据训练结果选出一个最优网络模型，并使用该模型对红外手印的测试集进行目标提取。为了验证本文模型的优势以及其对红外手印的提取能力，分别采用搭建的 U-Net、Sobel 算子、分水岭分割方法、最大熵算法、Otsu 算法对红外手印图像进行提取。

实验结果如图 4 所示，共有 5 组数据和 4 组对比结果。图 4 中依次是输入图像以及采用本文 U-Net 网络、Sobel 算子、分水岭算法、最大熵算法和 Otsu 算法得到的图像。

各种方法的预测结果表明，Sobel 算子所提取到的手印噪声信息过多，无法得到清晰连续的轮廓；分水岭算法所提取到的手印噪声点信息较多，难以获得有效的手印特征；最大熵和 Otsu 算法的提取结果基本相同，都只能获得大

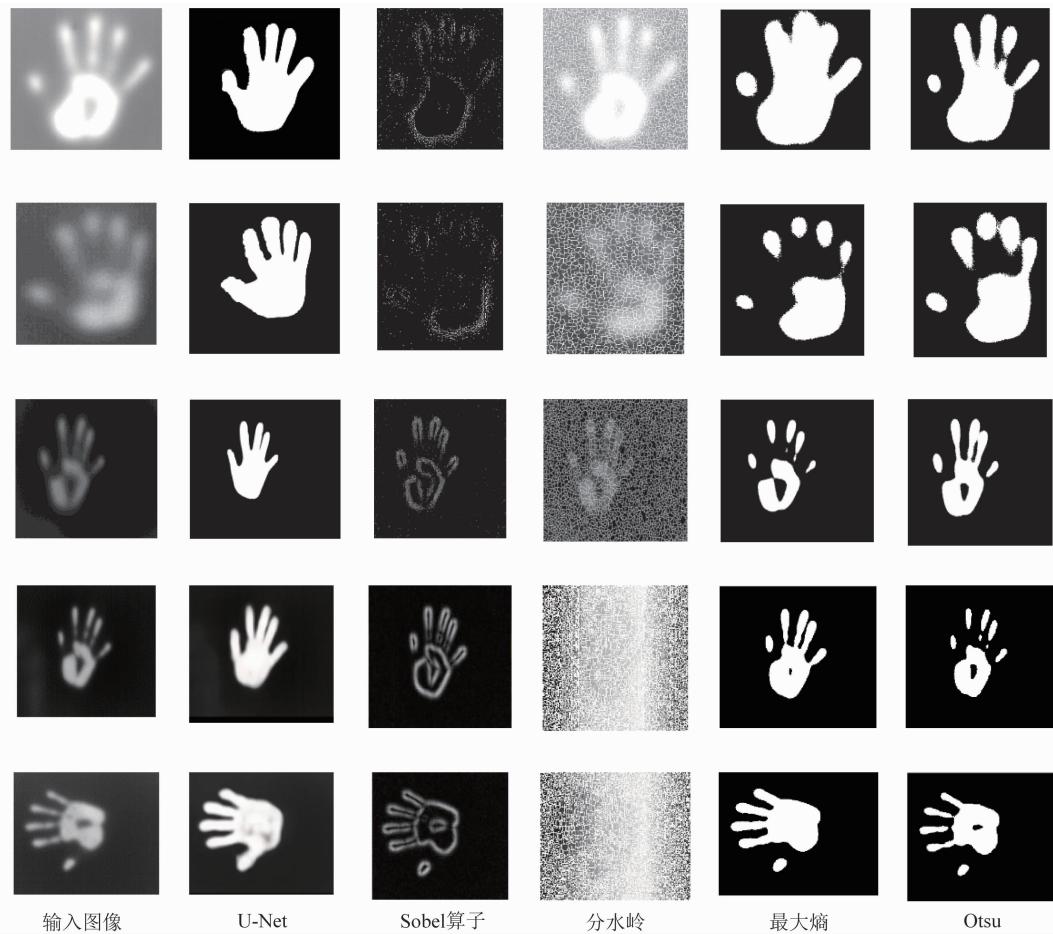


图 4 不同方法的预测效果对比

致轮廓信息，但得到的手印不连续并存在空洞。相比之下，本文搭建的 U-Net 网络能够提取出清晰连续的手印图像，且手部特征较为完整。此外，该网络的提取结果与原输入图像的手印分布极为接近，证明了本文方法的准确性。

4 结束语

热传递会使红外手印的边缘模糊化，增大了目标提取难度。针对现有的刑侦红外手印图像边缘模糊的问题，本文使用 U-Net 模型进行红外手印的提取。该模型不需要过多的训练样本即可获得较好的提取效果。通过引入 Dropout 和 Batch Normalization 两种结构，提高了网络的收敛速度并抑制了过拟合。网络实验结果和对比实验分析表明，本文模型在模糊红外手印图像提取方面具有一定的实用价值。但是在真实的刑侦现场拍摄的红外手印可能会比较复杂或者有其他的干扰因素(如手印重叠、深

度模糊等问题)，因此下一步需要将这些问题与现实联系起来，以便更好地为刑侦工作提供支持。

参考文献

- [1] 刘成. 警用模糊图像增强系统 [D]. 北京: 中国 人民公安大学, 2019.
- [2] 詹宗俊, 向宇. 显微红外成像技术在刑侦领域的应用 [C]. 北京: 决策论坛——决策理论与 方法研究学术研讨会, 2016.
- [3] 李凯臣. 红外刑侦手印图像目标提取算法研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [4] 朱小鹏. 基于深度学习的人体红外图像步态识 别方法研究 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [5] 叶溪. 基于生物因子机理的红外刑侦图像目标 提取算法研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [6] Ghaneizad M, Kavehvash Z, Aghajan H. Human detection in occluded scenes through optically in-

- spired multi-camera image fusion [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, **34**(6): 856–869.
- [7] 黄巍, 黄辉先, 徐建闽, 等. 基于 Canny 边缘检测思想的改进遥感影像道路提取方法 [J]. 地球科学学报, 2019, **31**(1): 65–70.
- [8] 刘嘉文. 复杂场景目标识别特征分析与跟踪算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 刘莉, 钱雪飞, 刘珊, 等. 改进高帽变换的红外目标增强和提取算法 [J]. 激光与红外, 2020, **50**(7): 882–888.
- [10] 向涛. 基于显著区域提取的红外图像舰船目标检测 [J]. 电讯技术, 2020, **60**(7): 785–790.
- [11] 秦立峰, 张晓茜, 董明星, 等. 基于多特征融合相关滤波的运动奶牛目标提取 [J]. 农业机械学报, 2021, **52**(11): 244–252.
- [12] 程曦, 季茂荣, 王宏伟. 基于差分形态滤波和 K-means++聚类的多地雷目标红外图像处理 [J]. 红外, 2021, **42**(11): 25–32.
- [13] Shelhamer E, Long J, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, **39**(4): 640–651.
- [14] 郭新, 张斌, 程坤. 面向小目标提取的改进 DeepLabV3+模型遥感图像分割 [J]. 遥感信息, 2022, **37**(2): 34–44.
- [15] 徐海祥, 龙泽升, 冯辉. 水面图像目标检测的强语义特征提取结构 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, **49**(4): 38–43.
- [16] 高博钰, 杨波, 张德国. U-Net 深度卷积神经网络在沙脊线提取中的应用 [J]. 中国沙漠, 2021, **41**(5): 21–32.
- [17] 李俊芳, 李凯臣, 于晓. 基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法 [J]. 红外, 2021, **42**(10): 33–44.
- [18] 杨丽丽, 陈炎, 田伟泽, 等. 田间道路改进 UNet 分割方法 [J]. 农业工程学报, 2021, **37**(9): 185–191.