2022年12月

文章编号: 2095-4980(2022)12-1238-07

基于U-net的被动式太赫兹安检危险品分割方法

赵耀

(中国铁路设计集团有限公司 电化电信工程设计研究院, 天津 300308)

摘 要:针对被动式太赫兹安检系统检测图像识别危险物难度较大、精确度不高的问题,提出一种基于U-net的被动式太赫兹安检危险物分割算法。通过构建危险品的局部结构差异性假设和局部亮度差异性假设定位太赫兹安检图像中危险品可能存在的感兴趣区域(ROI),并选择拥有少量特征通道与神经元的浅层卷积网络针对ROI做图像超分辨处理,最后将图像输入U-net网络,得到质量高、轮廓清晰的危险品分割图像。通过实验证实了本文方法相比传统分割算法准确性有明显提高,有助于提高被动式太赫兹安检系统的危险品识别率。

 关键词:大赫兹成像;安检;图像处理;目标分割

 中图分类号:TN911.73
 文献标志码:A

 doi:10

doi: 10.11805/TKYDA2021382

Hazard segmentation algorithm of passive terahertz security check based on U-net

ZHAO Yao

(Electrification & Telegraphy Engineering Design Research Department, China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: A dangerous item segmentation algorithm for passive terahertz imaging security inspection is proposed in response to the difficulty and low precision of dangerous item recognition in the passive terahertz imaging. First of all, the hypothesis of the dangerous item local structural difference and the hypothesis of the local luminance difference are made to locate the Region Of Interest(ROI) where dangerous items might exist in terahertz images. Meanwhile, the shallow convolutional network containing a few feature channels and nerve cells is chosen for super-resolution processing of images in ROI regions. The images are input into the U-net to obtain high-quality and clearly-outlined partitioned images of dangerous items. Finally, an experiment is conducted to verify the improvement of the detection accuracy of the proposed algorithm in comparison with traditional partitioning algorithms. This is conducive to improving the recognition rate of dangerous items by the passive terahertz imaging security inspection system.

Keywords: terahertz imaging; security check; image processing; target segmentation

对旅客携带的物品进行安检与人体安检是避免危险事件发生的有效手段^[1]。现有的常用安检手段主要为金属 探测结合X射线成像技术:金属探测技术用于人身携带的金属物品探测,无法有效识别陶瓷刀具、液体可燃物 和塑胶炸药等非金属危险物品;X射线成像技术成像质量高,但其电离特性会对人体造成电离损伤,因此常用 于箱包安检,不用于人体安检。针对安检系统对人体探测领域存在的不足,近年来出现了基于被动式太赫兹成 像的人体安检技术。

太赫兹波是指频率范围为0.1~10 THz的电磁波,对很多非金属、非极性物质有良好的穿透性,其光谱能量很低,不会电离损伤生物组织^[2-5]。被动式太赫兹成像安检技术,依靠人体自身辐射的太赫兹波进行成像,具有安全性高、隐蔽性好等优势^[6],但受辐射强度弱、个体差异性等影响,成像分辨力相对较低,存在危险品识别难度大,精确度不高等问题。针对上述问题,利用分割算法提取太赫兹图像中的危险品成为被动式太赫兹安检系统应用的关键技术。徐华晟等提出了一种基于最大二维熵的隐蔽目标分割方法^[7],该方法实现了被动式太赫兹隐蔽

收稿日期: 2021-10-25; **修回日期**: 2021-12-13 **基金项目**: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题资助项目(2020YY240802) 目标的分割任务,可以分割出异物但无法区分该物体是否为危险品。雷萌等提出一种基于局部信息模糊聚类的 太赫兹图像分割算法^[8],能够很好地描述模糊性,但成像时的噪声无法有效区分。ZHANG Jinsong等提出了一种 改进的基于阈值分割的快速区域卷积神经网络方法^[9],但对于小尺度物体的判定太过宽泛,缺乏针对性。

本文提出一种基于U-net的被动式太赫兹安检危险物分割算法:基于局部特征假设提取危险品可能存在的感 兴趣区域(ROI),进行图像超分辨处理后输入U-net网络进行分割。ROI的提取有效提升了本算法的实时性,以 及对小尺寸物体的定位;超分辨力重构技术为提高危险品分割准确率提供了基础。实验结果表明,本文算法针 对被动式太赫兹图像危险品分割具有显著效果,准确性与实时性相较于原始U-net网络有明显提升。

1 算法流程

算法流程图如图1所示: a) 输入被动式太赫兹安检图像; b) 构建局部结构差异性假设和局部亮度差异性假 设,定位 ROI; c) 利用基于卷积神经网络的图像超分辨力(image Super-Resolution using deep Convolutional Neural Network, SRCNN)算法对 ROI进行图像超分辨处理; d) 重复步骤 b)~c)进行多目标物定位,保证分割准确性; e) 输入U-net 网络进行目标物分割; f) 利用客观评价指标对比本文算法可靠性。



图1 被动式太赫兹安检图像处理流程图

2 太赫兹图像预处理

2.1 感兴趣区域分割

本文从两方面建立危险品的局部特征假设:局部结构差异性假设和局部亮度差异性假设。局部结构差异性 描述危险品与其周围背景之间的结构非相似性;局部亮度差异性依据危险品与背景之间的亮度差异特征构造局 部亮度差异度量^[10]。

将太赫兹图像按照尺度p划分为9个局部子块,尺度为p的中心图像子块H^k_(i,j)为第k个子块)的8邻域图像 子块的灰度均值为:

$$m_{(i,j)}^{p} = \frac{1}{8p^{2}} \sum_{k=1}^{8} \sum_{x=1}^{p} \sum_{y=1}^{p} H_{(i,j)}^{k}(x,y)$$
(1)

太赫兹图像I中像素点(i,j)的局部特征差异表示为:

$$d_{(i,j)}^{p} = \alpha(I_{ij} - m_{(i,j)}^{p})$$
⁽²⁾

式中 α 为指示目标类型的参数,其确定方式为:目标类型已知时,若为亮目标,设置 $\alpha=1$;若为暗目标,设置 $\alpha=-1$ 。

二维高斯核函数构造p尺度下的局部对比度量为:

$$g(x,y) = \exp\left\{\frac{\beta(x-1)^2 + (1-\beta)(y-1)^2}{-2h^2}\right\}$$
(3)

式中*β*和*h*分别为权重参数和高斯标准差。

在局部区域内,由于背景与危险品的差异,危险品占据了大部分能量,在局部区域内出现明显对比度差异。 太赫兹安检图像的ROI确定中,局部结构差异主要针对大尺度的危险品,此类危险品轮廓清晰,与背景有明显 的非相似性。局部亮度差异主要针对小尺寸的危险品,此类危险品受系统的最大分辨能力与成像角度的限制, 无法很好地定位物体轮廓,但与背景有着明显的亮度差异。依据2种差异性假设,可以很好地应对不同尺度的危 险品,同时做到在预处理阶段进行危险品分类。如图2所示,图2(a)为基于局部特征假设定位的危险品区域,图 2(b)为两区域的局部亮度差异三维网格图。



2.2 图像超分辨力处理

针对太赫兹安检图像质量问题,应用 SRCNN 方法对 ROI 进行超分辨处理。如图 3 所示,计算过程主要分为 3 步:区域特征的提取与表示、非线性映射以及重建¹¹¹。为提取图像区域内的特征,通过一个常规卷积核与 ReLU 激活函数,对输入图像的区域特征进行编码,第一层可以表示为:

$$F_1(Y) = \max(0, W_1Y + B_1)$$
(4)

式中: Y为经过插值法预处理的低分辨力图像; W和B分别为滤波器和偏差。利用常规卷积核与ReLU激活函数 对第一层卷积的输出进行非线性映射:

$$F_{2}(Y) = \max\left(0, W_{2}F_{1}(Y) + B_{2}\right)$$
(5)

使用1×1卷积核压缩特征通道并减少神经元连接数量,有效提高整个算法的实时性。最后对特征图做卷积操作,合成重构图像为:

$$F(Y) = W_3 F_2(Y) + B_3 \tag{6}$$

在网络中输入低分辨力图像 *Y*,经过网络后得到分辨力提高、细节明显的超分辨图像 *F*(*Y*)。低层网络与小卷 积核的设计有效降低了网络的复杂度,改善了运算速度。经过处理的太赫兹安检图像为后续危险品的有效分割 提供了基础。



3 被动式太赫兹安检图像分割

3.1 传统分割算法

最大类间方差法(Nobuyuki Otsu method, OTSU)表示类间灰度均值方差,它以灰度均值为衡量参数,反映了 灰度幅值的差异程度。主要原理是通过不断的遍历(0,255)求取最大类间方差,从而找出最大类间方差取值最大时的最佳分割阈值。

$$T_0 = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{f(i,j)}{N}$$
(7)

式中: N=mn 为总像素点; f(i,j)为坐标(i,j)处图像的灰度值。以 T_0 为阈值,大于 T_0 为目标区域,小于 T_0 为背景 区域。

区域生长算法的基本思想是:将与种子预先定义性质相似的邻域像素添加到每个种子上,合并生成新的生长区域,而新增加的像素将继续作为种子点向四周生长,直至生长到边界或再也找不到满足条件的像素点为止^[12]。所提区域生长方法的最终分割区域集合*R*为:

$$R = \left\{ Q \cup S \,\middle|\, |q - s| \le T \right\} \tag{8}$$

式中: *S*为种子区域; *s*为种子区域中像素灰度值; *q*为生长像素的灰度值, *T*为限制生长的阈值, *Q*为灰度 值 *q*满足阈值关系的待生长区域集合。

3.2 改进的 U-net 网络

U-net 网络模型是一种卷积、下采样、上采样和拼接操作组成的编码器一解码器对称网络结构^[13],如图4所示。网络左半部分为收缩路径,右半部分为扩展路径。在收缩路径中输入太赫兹图像,经过3个重复的2次卷积和1次最大池化操作,将输入图像转换为特征图。在扩展路径中,经过解码部分的3个反卷积和上采样操作将特征图像还原为原图尺寸,在解码过程的每一次上采样后都会与编码部分对应的特征图进行融合,从而增加解码部分特征图的细节^[14]。



为保证系统的实时性,改进的网络对 ROI 区域与背景区域做针对性的权重分配,相较于传统网络对全尺寸图像进行计算,更小尺度的图像在一定程度上减少了网络运算量,也减少了背景对危险品分割的影响。同时利用激活函数加快收敛速度并避免梯度消失。

数据训练上,受距离和危险品种类的影响,图像中危险品像素点远少于背景区域像素点,常用的交叉熵损 失函数与激活函数组合的方案会出现较大的误差,因此本文使用加权损失函数,并赋予加权损失函数较大的权 重来克服上述问题:

$$w(x) = w_{c}(x) + w_{0} \exp\left\{-\frac{\left[d_{1}(x) + d_{2}(x)\right]^{2}}{2\sigma^{2}}\right\}$$
(9)

式中: $w_c(x)$ 为平衡类频率的权重值; $d_1(x)$ 为与x最近的危险品距离; $d_2(x)$ 为与x第二近的危险品距离; w_0 和 σ 为 经验常数,根据人体与采集系统的距离,在实验中设置 $w_0=20$, $\sigma=10$ 。

4 太赫兹安检图像分割实验

4.1 实验环境与数据集

实验应用 MICROXCAM-384I-THz 型太赫兹焦平面阵列相机采集实验数据并制作针对太赫兹安检的数据集, 该数据集图像共480张,其中包含130张多种危险品太赫兹安检图像与350张不同尺寸管制刀具的单危险品太赫 兹安检图像。该数据集原始图像及标签图例如图5所示。

太赫兹科学与电子信息学报



(a) original image

(b) labeling of dangerous goods

Fig.5 Image labeling 图5 图像标记

4.2 客观评价指标

为量化对比本文所提出的模型,使用经典的量化评价指标:交并比(Intersection over Union, IoU)、Dice相似系数(Dice Similarity Coefficient, DSC)、全局准确率(Global Accuracy, GA)、精确率(Precision)和灵敏度(Sensitivity)。 其中 IoU 为图像分割问题的标准性能度量指标,给定一组图像时,IoU 给出在该组图像中存在的预测区域和真实 情况区域之间的相似性,表达式为:

$$IoU = \frac{TP}{FP + TP + FN} \tag{10}$$

式中*TP,FP*和*FN*分别表示真阳性、假阳性和假阴性计数。IoU作为语义分割中的重要评价指标,本实验在评价 多种危险品的分割效果时主要参考此评价指标,其他评价指标作为辅助判据,表达式为:

$$DSC = \frac{2TP}{FP + 2TP + FN} \tag{11}$$

$$GA = \frac{TN + TP}{FP + TP + FN + TN}$$
(12)

$$precision = \frac{TP}{FP + TP}$$
(13)

$$sensitivity = \frac{TP}{FN + TP}$$
(14)

4.3 实验结果及分析

本实验分别对比了OTSU、区域生长法(region growing)、U-net 网络与改进的U-net 网络对太赫兹安检图像危险品的分割效果,如图6所示。对比发现,OTSU,region growing无法有效分割危险品区域;传统U-net 网络边缘分割不准确;本文算法能够有效分割,且边缘分割准确,效果明显。



Fig.6 Segmentation effect of passive terahertz security check image with four different algorithms 图 6 四种不同算法的被动式太赫兹安检图像分割效果

本实验还对比了安检中可能出现的不同种类危险品,如图7所示,危险品最小尺寸为15 mm×50 mm的折叠 小刀。实验表明,本文提出的算法在面对小尺寸的危险品时依旧有较好的分割效果。针对实际安检中存在人员 携带多种危险品的可能,同时对比了4种算法在多目标物情况下的表现,如图8所示。其中OTSU法和 region growing无法做到完整区分不同种类的危险品,出现无法区分危险品的轮廓、分割不完整等情况;传统U-net算 法在危险品距离较近时出现轮廓不清楚的问题;本文算法通过提取 ROI 区域进行超分辨力重构,改善了图像质 量,有效提高了 U-net 网络分割的准确率。

第 20 卷



Fig.7 Terahertz security check images of dangerous goods of different types 图 7 不同种类危险品的太赫兹安检图像



 Fig.8 Passive terahertz security check image segmentation of multiple objects

 图 8 多目标物的被动式太赫兹安检图像分割

为证实本文算法在太赫兹安检图像分割上的效果,本实验对比了不同种类危险品的 IoU 评价指标、Dice 相似 系数、全局准确率、精确率与灵敏度。相较于传统算法,本文算法在语义分割的准确率与可靠性上有明显改善。相较于传统 U-net,本文算法在 IoU 指标上提高 12.7%,DSC 提高 2.7%,GA 提高 8.4%,Precision 提高 5.4%,Sensitivity 提高 3.1%,如表 1、表 2 所示。

	表1 不同种类危险品的 IoU 评价指标
Table1 IoU ex	valuation indexes of different types of dangerous

Table1 IoU evaluation indexes of different types of dangerous goods							
	object1	object2	object3	object4			
OTSU	0.166 6	0.102 0	0.012 2	0.010 6			
region growing	0.401 8	0.315 8	0.182 2	0.145 4			
U-net	0.662 0	0.633 2	0.625 7	0.658 5			
improved U-net	0.838 1	0.737 5	0.724 7	0.785 9			

Table2 Objective evaluation indexes of different algorithms	表2 不同算法的客观评价指标	
	Table2 Objective evaluation indexes of different a	lgorithms

0.75	OTELI	region growing	U-net	improved
	0150			U-net
DSC	0.648 3	0.758 3	0.792 3	0.819 2
GA	0.434 1	0.593 7	0.840 3	0.923 9
Precision	0.593 4	0.638 4	0.729 2	0.783 4
Sensitivity	0.423 9	0.792 3	0.917 3	0.948 2

1244

针对大型公共场所的人体安检需求日益增加,本文提出一种基于U-net的被动式太赫兹安检危险物分割算法。根据局部亮度差异性假设和局部结构差异性假设,快速定位危险品可能存在的区域,并对上述区域做图像超分辨力处理,以提升图像质量。最后将太赫兹图像输入U-net网络做危险品分割处理。由于感兴趣区域和图像超分辨力重构技术改善了图像质量的同时减少了网络的计算量,加快了网络的计算速度,使模型在具有高精确度的情况下保持较好的泛化能力。经过实验证明,本文提出的算法在改善图像质量、分割准确度上效果更好。相比传统U-net网络,在IoU, DSC, GA, Precision, Sensitivity性能均有提高。

参考文献:

- [1] 冯辉,涂昊,高炳西,等. 被动毫米波太赫兹人体成像关键技术进展[J]. 激光与红外, 2020,50(11):1395-1401. (FENG Hui,TU Hao,GAO Bingxi,et al. Progress on key technologies of passive millimeter wave and terahertz imaging for human body screening[J]. Laser & Infrared, 2020,50(11):1395-1401.)
- [2] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(2):1-6. (ZHAO Guozhong. Progress on terahertz science and technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014,33(2):1-6.)
- [3] HU B B,NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995,20(16):1716–1718.
- [4] XU Jiaming, CHEN Lin, ZANG Xiaofei, et al. Triple-channel terahertz filter based on mode coupling of cavities resonance system[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(16):161116-1-4.
- [5] 姚建铨.太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010,22(6):703-707. (YAO Jianquan. Introduction of THz-wave and applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010,22(6):703-707.)
- [6] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):843-848. (CHENG Binbin, LI Huiping, AN Jianfei, et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843-848.)
- [7] 徐华晟,李超,方广有. 基于最大二维熵的被动式太赫兹安检目标分割[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):660-665. (XU Huasheng,LI Chao,FANG Guangyou. Concealed object segmentation based on maximum two-dimensional entropy for passive terahertz security[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):660-665.)
- [8] 雷萌,黄志坚,马芳粼. 一种基于局部信息模糊聚类的太赫兹图像分割算法[J]. 制造业自动化, 2015,37(6):118-120. (LEI Meng,HUANG Zhijian,MA Fanglin. A THz image segmentation algorithm based on fuzzy local information c-means clustering[J]. Manufacturing Automation, 2015,37(6):118-120.)
- [9] ZHANG Jinsong, XING Wenjie, XING Mengdao, et al. Terahertz image detection with the improved faster region-based Convolutional Neural Network[J]. Sensors(Basel Switzerland), 2018,18(7):2327-2346.
- [10] 夏超群.基于局部和全局特征表示的红外小目标检测算法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021. (XIA Chaoqun. Research on infrared small target detection methods based on local and global feature representation[D]. Hangzhou, Zhejiang, China: Zhejiang University, 2021.)
- [11] CHAO Dong, CHEN Changge, HE Kaiming, et al. Learning a Deep Convolutional Network for Image Super-Resolution[C]// Proceedings of European Conference on Computer Vision(ECCV). Zurich:[s.n.], 2014:184–199.
- [12] 王宇彤,李琦. 进化算法优化区域生长的太赫兹全息再现图像分割[J]. 中国激光, 2020,47(8):319-329. (WANG Yutong,LI Qi. Terahertz holographic reconstructed image segmentation based on optimized region growth by evolutionary algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020,47(8):319-329.)
- [13] 周涛,董雅丽,霍兵强,等. U-Net 网络医学图像分割应用综述[J]. 中国图象图形学报, 2021,26(9):2058-2077. (ZHOU Tao, DONG Yali, HUO Bingqiang, et al. U-Net and its applications in medical image segmentation: a review[J]. Journal of Image and Graphics, 2021,26(9):2058-2077.)
- [14] 卢彻,徐胜华,朱军.改进U-Net的高分影像建筑物提取方法[J]. 测绘科学, 2021(12):140-146. (LU Che,XU Shenghua,ZHU Jun. Building extraction from high resolution remote sensing image based on improved U-Net model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021(12):140-146.)

作者简介:

赵 耀(1985-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为通信信息技术.email:zhaoyao@crdc.com.