

基于机器视觉的烟草在线检测技术研究进展

吴玉生^{1**}, 李安虎^{2*}, 万亚明², 孟天晨²¹厦门烟草工业有限责任公司, 福建 厦门 361022;²同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804

摘要 烟草行业高端产品规模的扩大与消费者对产品质量需求的提高, 给烟草在线检测技术带来了巨大挑战。针对烟草生产过程中烟丝异物难以剔除, 影响卷烟口感、烟草叶片病情害种类繁多且病情复杂、卷烟外包装瑕疵难以识别等问题, 传统人工在线检测方法效率低下, 且正确率难以保证, 无法适应我国烟草行业的高质量发展。在阐明基于机器视觉的烟草在线检测原理的基础上, 围绕视觉检测原理和深度学习模型两个方面系统地阐述烟草在线检测技术的研究现状与最新进展, 结合现有典型应用分析不同视觉模型以及深度学习模型检测方法的优越性和局限性, 进而探讨基于机器视觉的烟草在线检测技术的发展趋势和前景。

关键词 机器视觉; 图像识别; 深度学习; 在线检测; 瑕疵剔除

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231332

Progress in Research on Tobacco Online Inspection Technology Based on Machine Vision

Wu Yusheng^{1**}, Li Anhu^{2*}, Wan Yaming², Meng Tianchen²¹Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd., Xiamen 361022, Fujian, China;²School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract The expansion of high-end products in the tobacco industry and the increasing demand for product quality from consumers have created significant challenges for online tobacco testing technology. In response to problems such as the difficult removal of foreign objects from tobacco production affecting cigarette taste, various complex diseases from tobacco leaves, and difficulty in identifying cigarette packaging defects, traditional manual online detection methods are inefficient and it is difficult to ensure accuracy, which cannot adapt to the high-quality development of China's tobacco industry. From the perspective of elucidating the principle of tobacco online detection based on machine vision, this study systematically elaborates on the research status and latest progress of tobacco online detection technology based on two key aspects: the visual detection principle and deep learning models. Combined with current typical applications, this study analyzes the advantages and limitations of different visual models and deep learning detection methods, and further explores the development trend and prospects of tobacco online detection technology based on machine vision.

Key words machine vision; image recognition; deep learning; online inspection; defect removal

1 引言

烟草行业是中国的一种传统工业, 是国家税收的主要来源。因此, 加速国内的卷烟生产, 提高其生产效率, 减少人力费用和劳动强度, 对于国家的经济发展有着非常重大的作用。在生产过程中, 烟丝的纯净度将会直接影响成品烟支的口感和质量^[1], 与此同时, 烟支

和烟盒外观的破损也会影响产品的口碑。随着卷烟高端产品规模的扩大以及对各类细支烟生产要求的提高, 目前依赖于人工目测或是样品抽检的方法效率低下且烟草产品整体质量难以保证, 已无法满足现代化烟草生产流水线对烟草在制品进行检测、识别与剔除的需求。机器视觉作为一项集成光学感知成像、数字信息处理、自动化控制等诸多领域的综合性技术, 随着

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”项目“受限场景下机器人虚拟多视点精细化感知与定位技术研究”(22550711200)、福建中烟工业有限责任公司技术开发项目“机器视觉检测技术的深度开发与应用”(2022350200340315)

通信作者: lah@tongji.edu.cn; **21480276@qq.com

光电成像器件和基于深度学习的图像处理技术的迅速发展^[2],基于机器视觉的烟草在线检测技术受到了广泛关注。

本文对主流的基于机器视觉的烟草在线检测技术进行综述,展开介绍针对不同瑕疵目标的烟草在线检测视觉系统。结合典型应用分析不同视觉模型以及深度学习模型检测方法的检测效果,重点介绍基于深度学习模型的烟草在线检测方法的优越性,分析烟草在线检测技术的研究现状,指出当前烟草在线检测技术的主要问题与解决思路,展望烟草在线检测技术的发展趋势和研究方向。

2 烟草在线检测视觉系统

在烟草行业中,在线检测过程主要分为烟丝异物检测、烟支缺陷检测和烟盒外观检测等 3 种。针对不同检测物,烟草在线检测视觉系统具有不同的检测流程、剔除标准,以适应不同瑕疵对烟草产品的影响,进一步提高产品质量。本小节概述烟草行业生产流水线上不同的瑕疵检测标准、检测方法及现有检测装置。

2.1 烟丝瑕疵检测视觉系统

烟丝是卷烟配方中不可或缺的成分之一,烟丝结构以及烟支中的组分含量是评价卷烟口感和质量的关键指标^[3-4]。对于烟丝生产流水线而言,除了烟叶自身瑕疵,烟丝中还可能混入固体颗粒、烟杆碎屑和杂草等异物。这些异物会影响最终卷烟产品的品质和口感,甚至会危及吸烟者的健康,因此需要通过检测技术对烟丝混合物的外观、形态、结构等多个方面进行评估和判断,从而有效剔除异物。

目前常见的烟草异物识别剔除设备有金属异物剔

除设备、风分异物剔除设备以及光学异物剔除设备。金属异物剔除设备用于烟草切丝前,通过该设备剔除烟草混合物中含有的强磁性金属异物。风分异物剔除设备利用异物与烟草悬浮速度不同的特性达到剔除重质烟草异物的目的,主要集中在制丝和卷制过程中。但在风分过程中由于气流速度分布及烟丝物料成分不均匀,对于悬浮速度与烟草相差不大的异物则无法剔除^[5-6]。光学异物剔除设备是目前生产线上烟丝检测最常使用的检测设备,通常采用两种方式:激光除杂和视觉相机除杂。激光除杂的工作原理是在用传送带传送烟丝时,利用烟丝和异物对激光反射、吸收特性的不同来进行识别^[7]。与激光除杂装置类似,视觉相机除杂设备的工作流程为:将烟草混合物摊薄并由生产线同步带输送,通过工业相机获取烟丝实时图像,由图像处理系统识别异物并发出指令给剔除模块的执行机构,控制高压气流剔除异物^[8-9]。

目前,基于视觉的烟草在线检测技术已在各烟草企业得到广泛应用,如红塔烟草集团的烟草异物剔除系统^[10]、南京大树智能科技的烟叶异物剔除系统^[11]以及福建中烟工业公司的引入近红外光谱技术的烟草异物剔除装置^[12]等。

图 1 为基于视觉相机的烟丝输送状态检测装置^[13],相比于金属异物剔除和风分异物剔除设备,光学烟草异物剔除设备的识别范围更广,能够检测和剔除与烟丝性质相似的异物,但对图像处理检测算法具有较高的要求。然而,视觉相机只能检测烟丝层表面的异物情况,因此在进行检测之前需要对烟草混合物进行摊薄操作。如果摊薄的烟丝层不均匀,会导致局部区域出现堆积,可能会造成异物漏判。

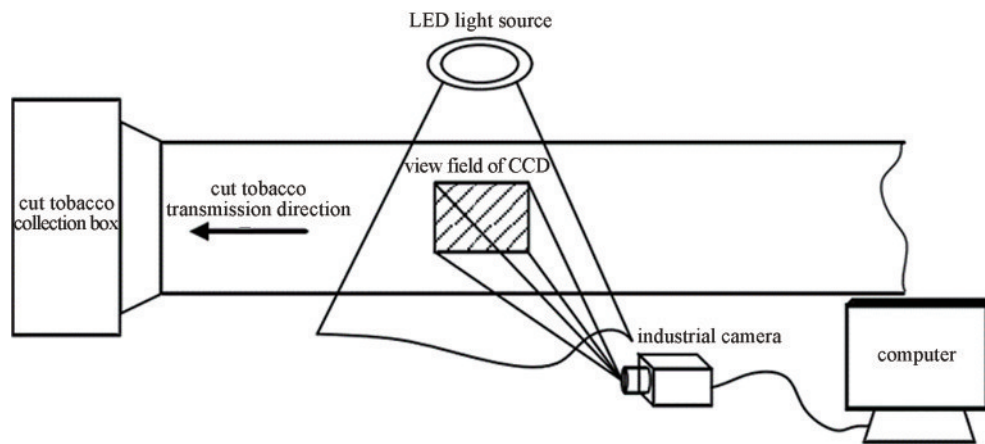


图 1 烟丝输送状态视觉检测系统整体结构^[13]

Fig. 1 The overall structure of vision inspection system for tobacco conveying state^[13]

2.2 烟支缺陷检测视觉系统

在卷烟产品生产加工过程中,工艺因素往往导致流水线上的烟支出现各种缺陷,包括烟支端面烟丝空缺、烟支表面缺陷以及烟包缺支等。为了保证卷烟产品的形象和质量,需要基于机器视觉对烟支的外观进

行检测。图 2 中,通过工业相机采集不同位置的烟支图像,采用合适的图像处理算法剔除次品烟支,严格控制卷烟产品的质量。

在烟支空头、缺支检测方面,主流的烟支计数识别方法之一是基于数学形态学的方法^[14-16],该方法首先

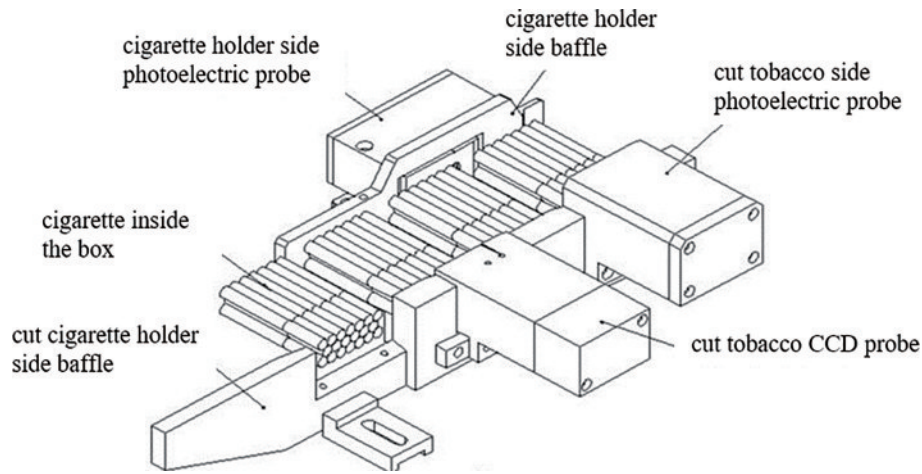


图2 烟支缺陷视觉检测装置图

Fig. 2 Visual inspection device for cigarette defects

利用形态学方法对二值图像进行滤波去噪,然后对每个独立的标记区域进行形状分类,并使用不同的结构元素进行开运算操作。在腐蚀操作之后、膨胀操作之前判断每个标记区域是否代表一个单烟支,从而实现烟支的分类处理。张剑^[17]通过将亮度参量和色度参量分开进行表示的像素编码格式,对图像进行无监督聚类算法处理,并根据图像的像素聚类属性来分割图像。田秀侠^[18]将遗传算法用于烟支计数和识别,具有较好的检测效果。Sheng等^[19]通过图像分割和形态学操作从背景中区分烟支区域,然后使用三线性模型对每支烟支进行定位,通过计算每个得到区域的像素数来确定烟支是否有缺陷。Qu等^[20]基于机器视觉构建一种图像处理系统对烟盒中烟支图像进行三维重建,通过自适应调整阈值计算滤棒在不均匀区域中的数量。

在烟支表面缺陷检测方面,Xiao^[21]通过Canny算子提取烟支,然后通过分析灰度图像中不完整部分的面积比来确定缺陷,Li等^[22]用最大轮廓面积测定法检测出具有显著缺陷的烟支,再用模板匹配法检测出具有轻微缺陷的烟支。随着深度学习的发展,Ying等^[23]利用卷积神经网络法对烟包错位、损伤和缺失等进行检测,具有较高的检测准确率。Liu等^[24]提出一种基于C-CenterNet的卷烟外观缺陷检测方法,该方法可减少非目标信息的干扰,能够增强网络提取有效特征的能力以及学习不同形状缺陷的能力。

目前,基于视觉的烟支缺陷检测已在烟草企业中得到广泛应用,例如上海烟草机械公司的烟支视觉检测的图像信息采集装置^[25]和上海奇信机电设备公司的烟支外观缺陷视觉检测系统^[26]等,主要通过CCD相机直接采集烟支表面图像,由视觉检测算法对不合格烟支进行剔除。

2.3 烟盒包装检测视觉系统

在烟盒包装烟支过程中可能会出现烟盒变形、烟盒开裂、烟盒表面刮擦、印刷错误以及烟盒标签缺失等

问题,任何包装缺陷都会在一定程度上影响产品的品牌形象。传统的烟支包装生产线的烟盒外观检测主要采用基于模板匹配方式的视觉检测算法,陶徐^[27]通过机器视觉对烟支包装盒进行检测,通过工业相机对待检测烟盒图像进行边缘检测、模板匹配、灰度分析以及二值分割实现了烟盒包装印刷缺陷的检测。刘浩等^[28]建立了真伪卷烟包装鉴别模型,利用图像识别技术对烟盒外包装进行图像处理 and 特征向量提取,能够在复杂环境下提高烟盒包装真伪鉴别效率和准确率。但此类基于模板特征匹配的检测方法速度相对较慢、效率较低,随着深度学习算法的发展,卷积神经网络开始被应用于烟盒包装检测上。陈同宇等^[29]通过在原始的YOLOv3深度学习网络中增加4倍的降采样并改进损失函数,使得烟盒缺陷的平均检测精度提升了约7%。Xu等^[30]提出一种改进的Bilinear-VGG16模型,提高了生产线上烟盒的平均检测速度和准确率。

随着视觉检测技术的不断成熟,越来越多烟草企业将视觉检测技术用于烟盒的缺陷检测任务中^[31],如上海烟草集团的烟盒外观检测设备^[32]、深圳市三叶草科技的智能卷烟小包外观检测设备^[33]以及重庆中烟工业公司的卷烟盒外观缺陷检测系统^[34]等,如图3所示。

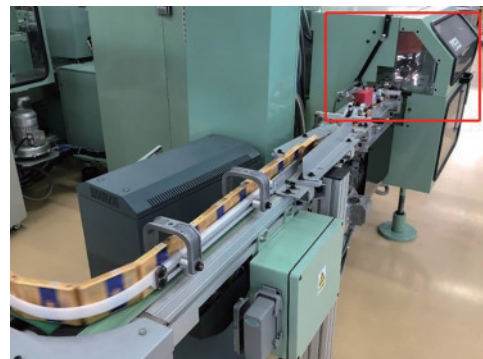


图3 烟盒外观视觉检测装置

Fig. 3 Visual inspection device for cigarette box appearance

2.4 小结

烟草在线检测视觉系统在卷烟加工生产线上发挥着重要作用。这些系统通过图像处理和深度学习技术,能够快速准确地检测烟草在制品的缺陷和问题,提高生产线的效率和质量管理水平,减少人为错误和废

品率,为卷烟产品的生产和质量控制提供了可靠的支持。随着技术的不断进步和发展,这些检测系统的性能和应用范围将会进一步提升。针对在制品不同检测系统,分析其在处理速度、检测精度、剔除难点等方面的差异,如表 1 所示。

表 1 常见在制品在线检测系统比较分析

Table 1 Comparative analysis of common tobacco product online inspection systems

Technical indicator	Tobacco filament defect detection system	Cigarette defect detection system	Cigarette packaging inspection system
Detection targets	Tobacco filament mixture	Multiple cigarettes	Cigarette packaging
Processing speed	Relatively fast	Relatively fast	Fast
Detection accuracy	Average	High	High
Removal difficulty	Complex	Simple	Simple
Technological maturity	Relatively mature	Relatively mature	Relatively mature
Main difficulties	It is difficult to visually identify similar impurities in the tobacco filament, and the removal of impurities is complex, resulting in low efficiency	The cigarette's surface damage is complex, and there are situations such as empty heads and missing cigarettes, which require high precision from the recognition detection algorithm	The defects in cigarette packaging are diverse, and the production speed of cigarette packs is high, which demands high real-time performance and processing speed from the hardware

3 基于图像处理的烟草在线检测方法

传统的基于机器视觉的烟草在线检测方法主要采用图像处理的方式,通过分析图像中目标颜色、形状、纹理等特征,检测烟草在制品的缺陷。首先,通过图像预处理技术,如高斯滤波、中值滤波以及均值滤波等^[35]去除噪声;然后,对图像进行增强处理,使图像整体更加清晰;最后,采用阈值分割分离背景,突出感兴趣特征等,提高在制品在视觉检测过程中的准确性和效率,同时也可以提高检测系统的稳定性和可靠性,为后续的瑕疵分类、识别和剔除奠定基础。

3.1 基于颜色空间的检测方法

在颜色特征检测中,通常使用颜色空间来表示图像中的颜色信息,比如 RGB 颜色空间和 HSV 颜色空间等。其中,HSV 颜色空间将颜色信息具体分离为色

相、饱和度和亮度等 3 个分量,广泛应用于颜色特征检测中。

在烟草在线检测中,李阳莹^[36]基于颜色特征对烟草异物图像进行检测,通过分析烟草图像中的颜色特征,能够达到 99% 的异物剔除率。沈文超^[37]在基于颜色模型识别算法的基础上,提出一种适用于烟叶图像的背景分割算法,有效解决了过分割问题。此外,通过视觉系统提取烟丝混合物 HSV 颜色空间 H、S、V 各分量的数值,可有效检测出不同烟丝的成熟情况^[38]。对于盒内烟支的空头、缺支检测,可以通过改变 R、G 和 B 的分量,或是基于 HSV 颜色空间改变各像素点色相、饱和度和亮度的分量,对烟支产品的图像空间进行灰度化处理,突出缺陷特征^[39]。或是在烟盒图像空间进行亮度的均衡,优化整体对比度,使缺陷部位更为清晰^[40],如图 4 所示。



图 4 烟支图像样本 HSV 空间分析^[40]

Fig. 4 HSV spatial analysis of cigarettes image samples^[40]

3.2 基于形状特征的检测方法

边缘检测是一种常用的图像特征检测方法,它通过寻找图像中灰度值变化剧烈的区域来检测目标边,在烟草产品的在线检测中起到重要的作用。常用的边

缘检测算法包括 Sobel 算子^[41]、Prewitt 算子^[42]、Canny 算子^[43]等,这些算法可以有效地提取图像中的边缘信息,为后续的烟丝、烟支、烟盒检测和识别提供准确的轮廓信息。庄珍珍^[44]在 YCbCr 颜色空间模型下,基于

区域生长分割法对烟叶图像进行分割,具有较好的背景分离效果,如图 5 所示。在烟支检测中,边缘检测可以用来提取目标轮廓,结合 Harris 角点^[45]、Shi-Tomasi



图 5 烟叶原始图像和分割后图像^[44]

Fig. 5 Original and segmented images of tobacco leaves^[44]

进一步地,通过形态学处理对图像进行膨胀、腐蚀、开运算、闭运算^[47-49]等处理操作,提取出感兴趣的目标区域,并去除其他不需要的信息。在烟丝混合物在线检测中,通过形态学处理方法调整不同的参数和结构元素,通过腐蚀处理去除待检测烟丝混合物中的边缘“毛刺”,通过开运算消除烟丝图像中的噪点,在不明显改变烟丝混合物图像整体连通域面积的同时平滑连通域的边界,为瑕疵检测提供更加清晰、准确的图像数据,如图 6 所示。

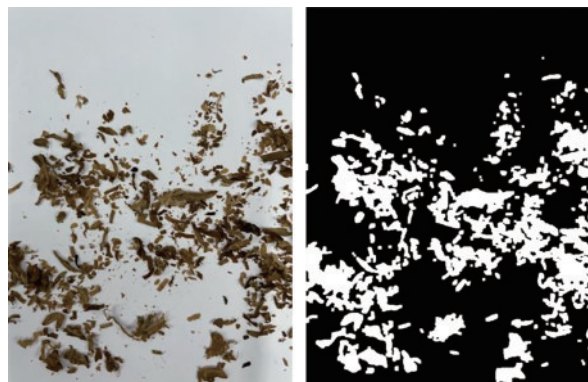


图 6 烟丝混合物原始图像和开运算效果图^[13]

Fig. 6 Original image and opening operation effect of tobacco mixture^[13]

3.3 基于纹理信息的检测方法

局部纹理检测如基于灰度共生矩阵^[50]、尺度不变特征变换(SIFT)^[51]、加速稳定特征(SURF)^[52]等检测算法,通常通过寻找图像中具有特定颜色、纹理或形状等特征的像素来进行检测,这些算法可以通过计算图像中像素值的相似性或匹配度来检测出具有特定特征的像素点。对于烟丝的视觉检测,邵素玲^[53]指出可以通过梯度直方图、灰度共生矩阵以及局部二值模式直方图的特征提取烟丝图像的关键点和描述符,进而提取出烟丝图像中的纹理特征。崔云月^[54]提出一种多特征融合的烟支外观质量检测算法,如图 7 所示,将局部阈值二值模式(LTBP)与方向梯度(HOG)算法提取的

角点^[46]等检测算法描述烟支的端点和烟丝的拐点,实现烟支和烟丝的检测和定位,从而进一步对烟丝、烟支的长度、直径、形态等特征进行提取。

烟支图像特征利用典型相关分析(CCA)特征融合后得到新的烟支图像特征,并用于后续检测,相比于一般的检测算法,其能够准确识别出烟支表面存在的各种缺陷。

3.4 基于光谱分析的检测方法

光谱特征是指物质在特定波长下吸收或散射光线的特性,对于烟丝而言,不同成分的烟丝对于光的吸收和散射特性也是不同的,因此可以通过分析烟丝的光谱信号来识别不同成分的烟丝。高光谱成像技术是一种结合图像和光谱的测量技术,在烟草在线检测技术中有广泛的应用,通过采集和分析烟丝光谱信号,可以实现对烟丝的质量和成分的准确检测。

烟丝在线检测技术中使用的光谱分析方法一般为近红外光谱,近红外光谱是将近红外光辐射到烟丝上,通过检测烟丝在不同波长下的反射光谱信号来获取烟丝的化学成分信息。李瑞丽等^[55]采用主成分分析法分析烟叶近红外高光谱数据,快速检测配方烟丝掺配均匀性;Sahu 等^[56]与 Marcelo 等^[57]通过采集烟草近红外高光谱图像,鉴别分析烟叶的化学特性和质量,与传统的人工分类相比,所获得的精度有显著的提升。同时通过分析烟丝的光谱信号,可以实现对烟丝的水分、糖分、尼古丁含量等成分的准确检测和量化。Divyanth 等^[58]将高光谱图像(HSI)和化学计量学模型相结合,预测烟草粉末样品中的尼古丁含量。此外,光谱特征还可以用于检测烟丝的形态、颜色等视觉特征,进一步提高烟丝在线检测的准确性和效率。但目前缺少对烟丝光谱数据的深入研究,导致在模型构建过程中,变量较多且计算量庞大,总体判别准确率难以满足要求。

针对卷烟加工生产线上烟丝、烟支以及烟盒各产品的视觉检测,目前传统的视觉图像处理算法的检测效率和准确度已难以满足生产需求。随着深度学习的发展,融合各类卷积神经网络的烟草在线检测技术对现代化烟草加工生产具有重要意义。

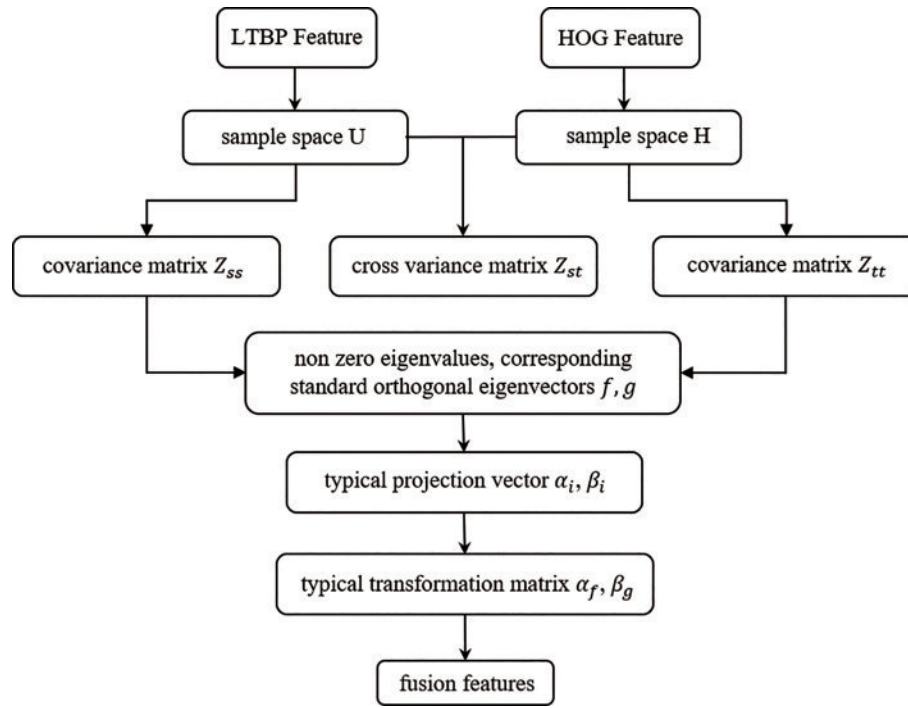


图 7 ULBP 特征与 HOG 特征融合流程图^[54]

Fig. 7 Flow chart of ULBP feature and HOG feature fusion^[54]

3.5 小结

基于颜色空间、形状特征、纹理信息和光谱分析的烟草在制品检测方法是机器视觉技术在烟草行业中的应用,可以根据不同的检测需求和缺陷类型选择合适的方法或结合多种方法进行综合检测。这些方法通过处

理和分析烟草在制品图像,实现对产品质量和缺陷的检测和识别。随着技术的不断进步,这些方法的准确性和效率将不断提升,为卷烟产品的生产和质量控制提供更可靠的支持。针对不同视觉检测算法,分析其优势、局限性以及适用场景等技术指标,如表 2 所示。

表 2 不同视觉检测算法比较分析

Table 2 Comparative analysis of different visual inspection algorithms

Technical Indicator	Based on color space	Based on shape features	Based on texture information	Based on spectral analysis
Methods	Using color histograms and color feature analysis to enhance image contrast	Using edge detection, contour extraction, and morphological processing methods for target detection	Using texture features and template matching to extract target features	Using a spectral camera to obtain target spectral feature information
Features	Intuitive and simple, easy to implement	Sensitive to overall shape changes	Sensitive to local texture features	Analyzes the spectral characteristics of samples
Advantages	Rich color information, sensitive to color differences	Strong detection ability for overall shape defects	capture specific texture features	analyze tobacco composition and quality
Limitations	Greatly affected by lighting conditions and environment	Limited detection ability for local defects	Difficulty in recognizing complex textures	Requires professional equipment, high cost
Applicable Scenarios	Detection of foreign bodies in tobacco filaments, empty heads of cigarettes	Detection of defects and damage in cigarette packaging	Detection of surface damage and stains on cigarettes	Tobacco composition analysis
Technological Maturity	Relatively mature	Relatively mature	Relatively mature	Requires professional equipment and technical support
Complexity	Low	Medium	Medium	High

4 基于卷积神经网络的烟草在线检测方法

传统机器学习算法在处理高维、复杂的卷烟加工数据时常常面临计算复杂度高、模型泛化能力不足等问题。相较于传统机器学习算法,深度学习具有显著的优势。首先,利用神经网络对海量数据进行多层次的特征表达,从而大幅提升特征抽取的效率。其次,深度学习模型可以处理更高维的数据,且已经在计算机视觉、自然语言处理等领域取得了突破,对于处理烟草加工图像和时序数据等方面具有巨大的优势。此外,深度学习模型具有强大的泛化能力,在广泛的烟草检测任务中表现出色。这些优势使得深度学习成为烟草在线监测领域的主流方法。各种深度学习模型,在烟草检测的各个应用层面取得了显著进展。

卷积神经网络本质上是将一个个简单的神经元连接起来,通过由神经元构成的隐藏层提取图像特征信息,通过多个隐藏层提取负载的图像信息,最终获得图像的高级语义特征。卷积神经网络以原始图像为输入,能够从海量的数据中高效地获取对应的特征,从而避开繁琐的特征抽取,其网络一般由输入层、卷积层、池化层、激活函数层以及全连接层构成^[59]。卷积神经网络工作原理如下:卷积层提取图像高级特征,通过激活函数使得特征的提取非线性化,池化层进行降采样操作对提取出来的特征进行压缩,全连接层整合之前各层提取的特征,最后输出各类别的预测概率。卷积神经网络由于具有局部连接、权重分配等特性,在平移、旋转、比例缩放等变化形态下,依然保持较高的精度。相比于传统神经网络易于优化的同时降低了过拟合风险,网络的运行速度变快,识别准确率较高,图 8 为卷积神经网络结构图^[60]。

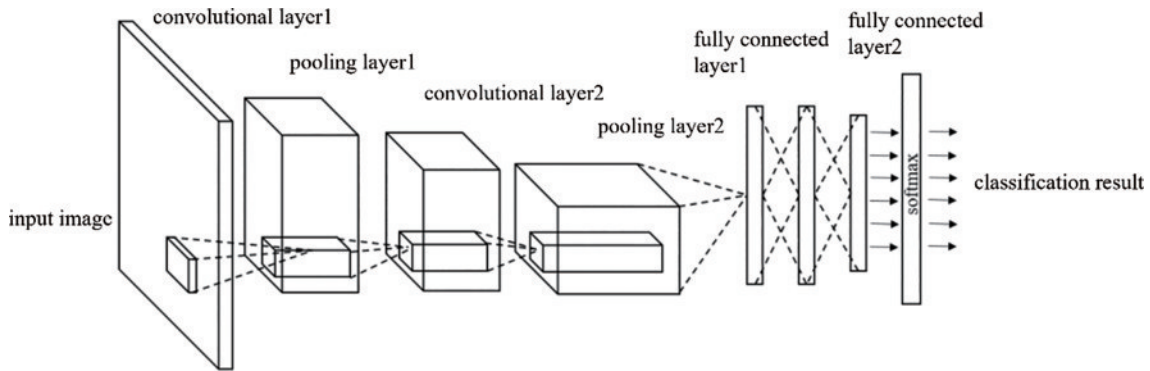


图 8 卷积神经网络结构图^[60]

Fig. 8 Convolutional neural network structure diagram^[60]

近年来,卷积神经网络已被广泛应用于图像处理领域中,诸如 AlexNet^[61]、GoogLeNet^[62]、VGG^[63] 等优秀的卷积神经网络架构在计算机视觉任务上取得了优异的表现。在此基础上,针对烟草在线监测这一特殊目标,有不少学者对此进行了深入研究。

4.1 烟丝成分检测方法

烟草成分多达数千种^[64],烟丝类型繁多。有效且精确分析出不同烟丝类型,能够保证卷烟产品的质量,减少有害成分,提高风味。国内已有多位学者对烟丝类型识别进行了大量的研究。

牛群峰等^[60]在 VGG16 网络的基础上进行改良,并把它运用到自己收集和建立的烟草图像数据集上,完成了 4 种烟草的识别,如图 9 所示,在 VGG16 框架下,通过降低卷积核心个数,对网络进行结构优化,进而改善网络的建模精度。在此基础上,通过引入残差建模,提高模型对不同特征形态的识别能力,并采用全局平均池化层而非常用的全连接层以进一步减少模型中的参数并避免过拟合。最后,将上述 3 种方法结合在一起,达到快速准确识别烟草种类的目的。与其他模型和方法相比,该研究提出的 Light-VGG 在烟丝类型识

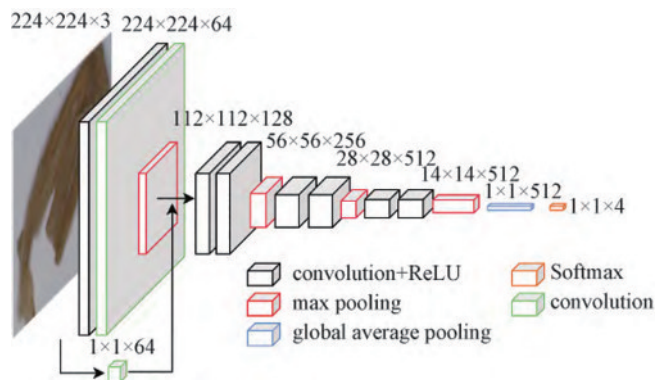


图 9 Light-VGG 网络结构^[60]

Fig. 9 Light-VGG network structure^[60]

别上的准确率达到 95.5%, 优于其他的神经网络。

高震宇等^[65]将图像分析的焦点集中在烟丝局部的小区域图像上,烟丝微观结构特征的局部特征图像如图 10 所示。在微观特征上,烟丝的各组成部分存在较为显著的差异,这些差异表现在颜色、形状和纹理等方面。通过分析识别每个特征图像对应的输出结果,并运用统计方法计算烟丝的组成成分。实验结果表明,

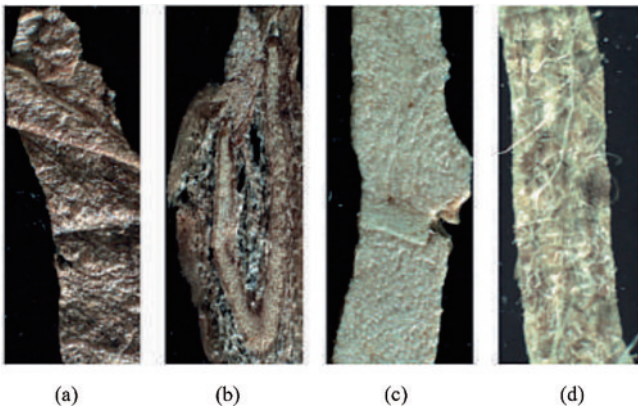


图 10 烟丝微观特征^[65]。(a)叶丝;(b)梗丝;(c)膨胀叶丝;
(d)再造烟叶丝

Fig. 10 Microscopic characteristics of cut tobacco^[65]. (a) Leaf filament; (b) stem filament; (c) expanded leaf filament; (d) reconstituted tobacco leaf filament

该方法能有效地鉴别不同组分的烟丝,鉴别准确率达 80% 以上。

胡世龙等^[66]以 LeNet-5 网络模型^[67-68]为基础,使用线性整流函数 ReLU 代替 Sigmoid,并在原网络中的 2 个卷积层中分别插入 2 个池化层,然后连接 2 个全连

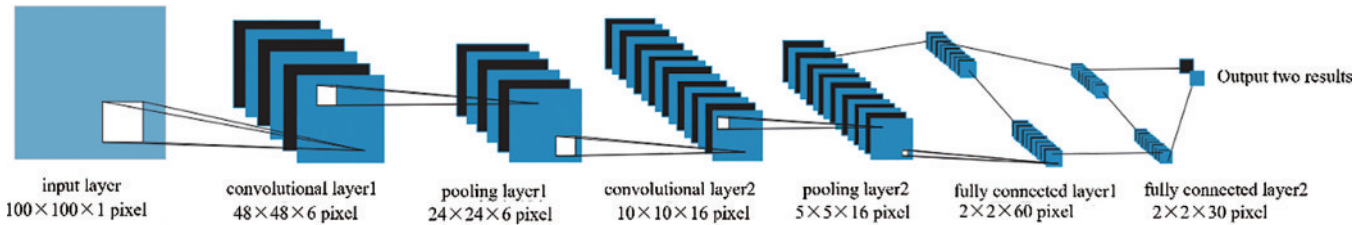


图 11 基于 LeNet-5 卷积神经网络模型的改进^[66]

Fig. 11 Improvement of convolutional neural network model based on LeNet-5^[66]

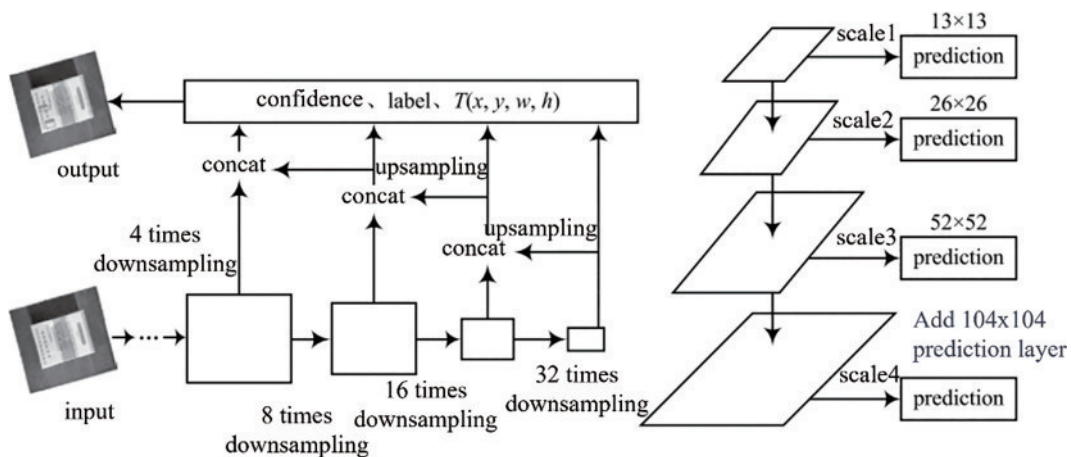


图 12 改进后的 YOLOv3 网络结构^[29]

Fig. 12 Improved YOLOv3 network structure^[29]

李珍珍^[71]提出一种基于自编码网络的图像重构 SAE 网络模型和无监督二次编码 TC 模型的缺陷检测算法。借鉴残差思想,在编码和解码网络中引入交叉

叠层,整个网络模型共有 8 层,如图 11 所示。在大量烟叶梗丝样本的实验验证中,识别模型采用多层训练,通过优化卷积神经网络的架构和结构参数,识别正确率超过 98%。

4.2 烟盒缺陷检测方法

烟盒包装印刷生产过程中的各种不确定因素,极易导致产品表面出现缺陷和瑕疵。深度学习方法可以直接利用数据本身来驱动特征及表达关系,从而对有问题产品进行预测,所以,它可以有效地解决传统的机器视觉包装印刷品检测方法中的问题^[69-70]。近年来,国内有不少学者将深度学习技术应用于烟盒包装检测上。

陈同宇等^[29]针对卷烟包装中存在的瑕疵,在原来的 YOLOv3 网络上,添加 4 次降采样,并改进损失函数,以提高图像候选检测区域相对于实际检测区域的尺度灵敏度,改进后的网络结构如图 12 所示。实验结果显示,优化后的网络平均检测精度从 90.81% 提升至 97.29%,查准率提高了 7%,查全率也提高了 7%。虽然实验的平均识别速率有所降低,但是不会对测试结果造成很大的影响。总体而言,与常规卷烟包装质量检验法相比,该方法具有更为突出的烟盒缺陷检测准确率。

叠加结构,以学习优质数据在潜在空间中的特征向量,并学习优质数据在图像空间与潜在空间中的对应关系。这样,在网络模型训练完成后,可以对优质数据进

行还原,同时对缺陷数据进行重构,得到对应的优质数据,网络基本结构图如图 13 所示。与无交叉叠加的网

络结构模型的实验对比表明,该模型在缺陷检测的检出率方面有所提高。

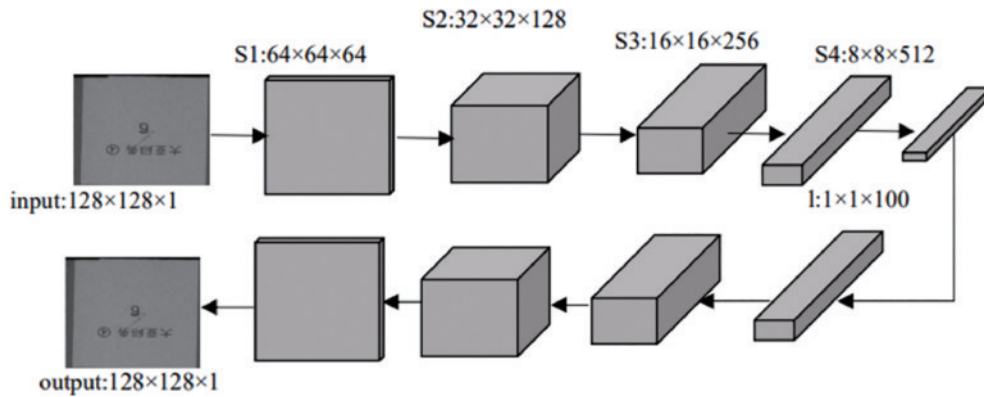


图 13 SAE 网络结构图^[71]

Fig. 13 SAE network structure^[71]

单宇翔等^[72]同样采用基于人工智能的图像识别技术,将烟盒实例化分割与烟盒图像几何正则化步骤相结合,消除了拍摄角度对识别结果的影响。同时,通过图像仿真方法解决了烟盒真实数据相对缺乏以及深度学习需要大量训练样本驱动之间的矛盾,整个识别流程如图 14 所示。通过上述设计的新型架构和方法,最终成功地构建了一个适用于复杂场景下的烟盒图像识别系统。

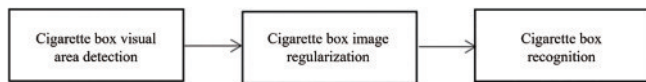


图 14 烟盒识别系统的流程^[72]

Fig. 14 The process of cigarette box recognition system^[72]

4.3 烟草病害识别方法

我国烟叶病害的类型多、发病机制复杂、流行速度快,且呈区域性和季节性特征,如果不能及时发现并及时防控,极易引起烟草病害的大规模扩散,从而引起烟叶产量和品质的下降,给我国烟叶的生产带来严重的经济损失^[73]。基于深度学习的烟草病害诊断方法能快速准确识别烟草病害保证烟草产量和品质,减少烟农损失。

张文静等^[74]在 InceptionV3 框架的基础上,利用迁移学习方法来构建烟草病害检测模型。该模型如图 15 所示,图像预处理模块采用图像增强方法、MSRCR 方法、Gamma 校正以及图像融合方法来扩充烟草病害数据集并尽可能减小光照条件变化对图像的影响。特征

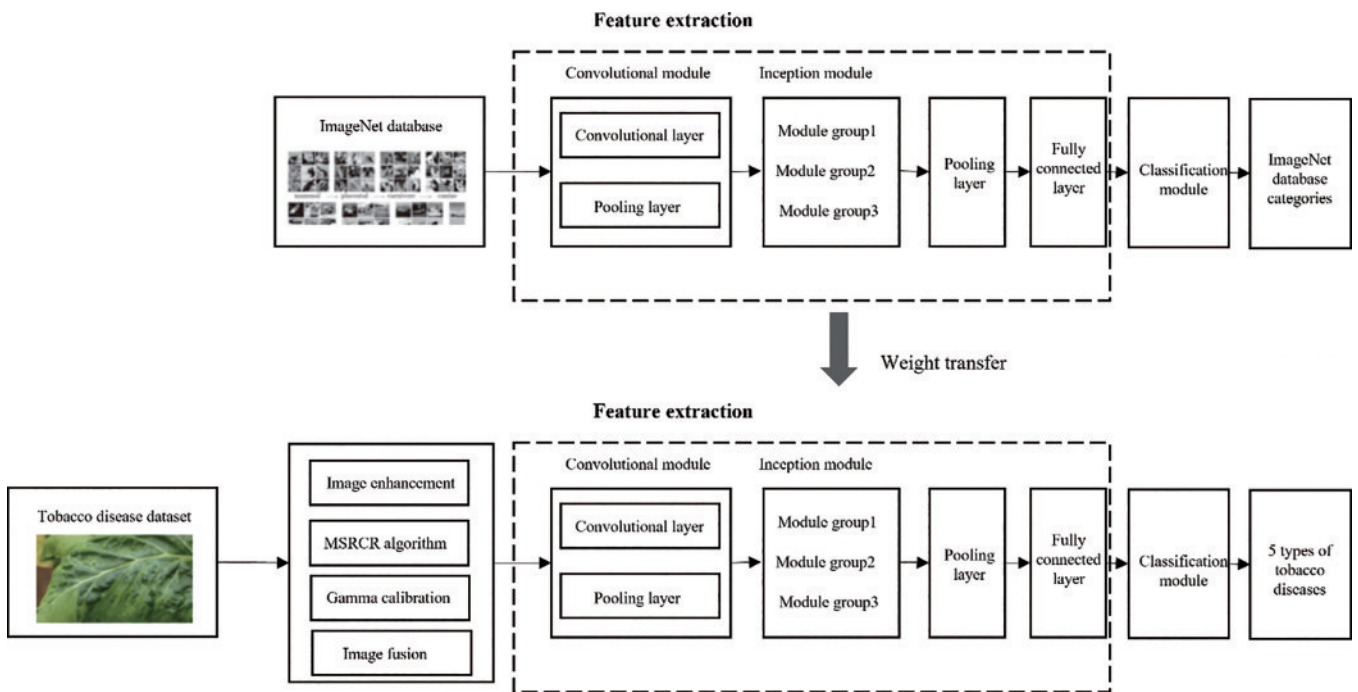


图 15 基于 InceptionV3 的烟草病害识别模型^[74]

Fig. 15 Tobacco disease recognition model based on InceptionV3^[74]

提取模块包括卷积模块、Inception 模块以及 Inception 模块相连接的池化层和全连接层。卷积模块由卷积层和池化层组成,而 Inception 模块由 3 个卷积模块构成。实验结果表明,相比于原方法 70.00% 的识别准确率,该方法的识别准确率提高了 29.71%,高达 90.80%,并且平均识别时间缩减为 1.33 s。

谢裕睿等^[75]采用支持向量机(SVM)与 ResNet 相结合的方式对疾病进行识别。在此基础上,采用 K-

means 聚类方法,从病斑中分离出 13 个不同维度的病斑。常规的 SVM 对烟草疾病的诊断效果不佳,传统的 SVM 方法在识别烟草病害方面表现并不理想。因此,该研究通过构建恒等残差块和卷积残差块建立 20 层 ResNet 模型,如图 16 所示。通过对 SVM 方法和基于 ResNet 的分类方法的比较发现,SVM 的分类精度为 50.23%,而基于 ResNet 的分类精度为 89.50%,显然分类精度得到了显著提升。

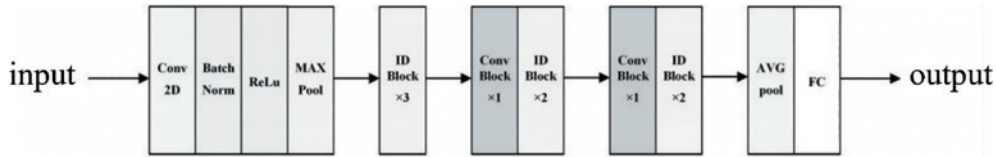


图 16 ResNet 20 模型结构^[75]

Fig. 16 ResNet 20 network structure^[75]

王平^[76]以 VGG-16 网络为基础,迁移学习建立了一套有效的人工神经网络,实现了 10 种烟草叶片病害的分类。迁移学习过程如图 17 所示。识别结果表明,该迁移学习方法对 10 种病叶片的识别准确率达到 85%。

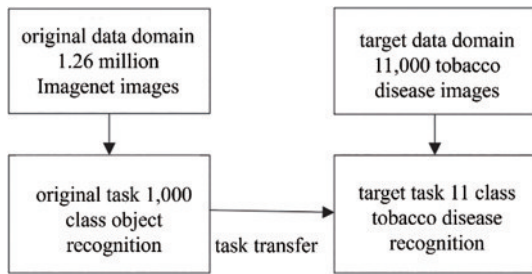


图 17 迁移学习过程^[76]

Fig. 17 The process of transfer learning^[76]

4.4 小结

相较于传统机器学习算法,深度学习在提取图像

特征、处理高维数据方面具有显著的优势,因此在烟草检测任务中逐渐成为了主流方法。针对烟草行业不同检测任务,分析了其原理、难点、改进方法等指标,如表 3 所示。

对于烟丝成分检测,通过特征分析和分类识别模型处理。由于烟丝形态小,异物繁多,改进方法包括使用残差模块提高对不同烟丝特征差异的学习能力,并使用全局平均池化抑制模型过拟合。在烟盒缺陷检测中,算法主要检测可视区域。由于烟盒摆放角度的随机性以及烟盒图像的密集程度,改进方法包括烟盒图像的几何正则化和仿真增强。烟草病害识别主要依赖于提取病害特征信息来构建识别模型。这一过程中的难点在于烟草病害发病初期特征不明显且某些病害特征较为相似。因此,需要增加数据集来收集更多的烟草病害特征图像数据以及通过数据增强的方法获得更多样化的数据,通过集成学习的方法,训练多个模型处

表 3 基于深度学习的不同瑕疵目标检测算法

Table 3 Different defect target detection algorithms based on deep learning

Defect target	Tobacco filament component detection	Cigarette box defect detection	Tobacco disease recognition
Common Networks	LeNet-5, Light-VGG Network, AlexNet, GoogleNet, etc.	Faster R-CNN, DarkNet-53, Optimized YOLOv3 Network, Self-encoding Network, etc	Improved-AlexNet, GoogLeNet, Inception v2, InceptionV3 Network, ResNet Network, VGG-16 Network, etc.
Methods	Analysis of tobacco filament features, construction of tobacco filament composition classification recognition model	Visual area detection of cigarette boxes	Extraction of disease feature information to build a disease recognition model
Difficulties	Small tobacco filament morphology, numerous impurities	Randomness in the placement angle of cigarette boxes, dense placement of cigarette box images	Tobacco disease symptoms are not obvious in the early stages and some disease features are similar
Improvement Methods	Use of global average pooling to suppress model overfitting	Geometric regularization of cigarette box images, simulation enhancement methods for cigarette box images	Increase the dataset and apply data augmentation techniques; employ ensemble learning, to enhance the model's robustness and accuracy

理相同的任务,将其输出组合在一起以增加模型的鲁棒性和精度。

5 结论与展望

随着我国烟草行业的蓬勃发展,目前依赖于人工目测或是样品抽检的方法效率低下且烟草产品整体质量难以保证,已无法满足现代化烟草生产线对在制品进行检测、识别与剔除的需求。随着向量机、神经网络、深度学习等相关算法的不断发展和优化,机器视觉技术已广泛地应用于工业检测领域,大幅度地提高了产品的质量和可靠性,保证了生产效率,针对烟草外包装瑕疵检测、卷烟成分质量分析、烟草病虫害识别等在线检测任务均体现出了较为成熟、稳定的效果,同时能够代替传统的肉眼识别,在减轻工人劳动强度的同时提高检测效率。

本文综述了目前较为成熟的基于机器视觉的烟草在线检测系统和流程,围绕视觉检测原理和深度学习模型两大方面,系统地阐述了烟草在线检测技术的研究现状与最新进展。传统机器学习方法在很大程度上依赖于选择的分类特征来提高识别和分类精度,而深度学习算法具有更好的效果,因此特别阐述了基于深度学习的烟草在线检测方法的优越性和有效性。

与此同时,烟草在线检测仍面临着许多问题。面对种类繁多不同种类烟草病虫害,如何从病虫害图像中提取出不同的病虫害特征?随着烟草行业的不断发展,烟草在线监测所承担的任务量逐渐加大。面对庞大的在线监测数据量,如何确保数据处理的及时性?综合烟草在线检测技术的发展历程和研究现状,以下几个方面可能成为该领域今后研究工作的重点。

1) 多传感器融合技术。现有的烟草在线检测技术多利用工业相机作为单一传感器获取图像作为烟草及外包装的信息。单一的图像信息难以获取完整的烟草外观、颜色、结构等信息。更丰富的检测信息无疑会提高特征提取的准确率,从而提高检测技术的准确性。例如,结构光传感器受环境光照和物体表面纹理的影响较小^[77-78],激光超声检测技术可以检测到烟丝的内部缺陷,同时具有极高的空间分辨率^[79]。将多光谱相机、红外成像、结构光、激光雷达扫描等多种传感器相结合,可以获取丰富的目标信息,从而提高烟草检测的全面性和准确性。

2) 大数据分析技术。随着烟草消费者需求的不断提高,对于烟草在线监测的效率与实时性都提出了更高的要求。应用大数据分析技术可以对海量的烟草检测图像进行实时分析和处理,提高检测速度和准确性。大数据技术能够实现图像的有效传递,并能使原始影像更清楚地重现,可以对二比特数据进行图像处理,从而提高图像的像素质量。同时,利用大数据技术对图像进行压缩、分割,能够很好地满足实际的图形处理需求。

3) 建立在线监测标准。烟草在线监测技术还未形成统一的技术规范,这将对检测过程的稳定性与安全性造成影响,同时也限制行业检测水平的提升。建立统一的烟草在线监测标准,包括建立图像处理、数据采集、评估指标等方面的标准将有助于各高校企业之间开展研究合作、数据共享。

参 考 文 献

- [1] 国家烟草专卖局颁发. 卷烟工艺规范[M]. 北京:中国轻工业出版社,2016.
- [2] 程松, 杨洪刚, 徐学谦, 等. 基于YOLOv5的改进轻量型X射线铝合金焊缝缺陷检测算法[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104005.
Cheng S, Yang H G, Xu X Q, et al. Improved lightweight X-ray aluminum alloy weld defects detection algorithm based on YOLOv5[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104005.
- [3] 黄小艳, 赵广仁, 黄晶, 等. 基于决策树和正交试验设计的打叶复烤工艺参数优化[J]. 天津农业科学, 2020, 26(9): 69-72.
Huang X Y, Zhao G R, Huang J, et al. Optimization of technological parameters of threshing and redrying based on decision tree and orthogonal experimental design[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2020, 26(9): 69-72.
- [4] 罗海燕, 方文青, 杨林波, 等. 叶中含梗率与相关打叶质量指标的关系[J]. 烟草科技, 2005, 38(7): 11-13.
Luo H Y, Fang W Q, Yang L B, et al. Relationship between stem content in lamina and tobacco breakage[J]. Tobacco Science & Technology, 2005, 38(7): 11-13.
- [5] 李春光, 孙觅, 刘强, 等. 叶丝风选工艺实用性评价[J]. 烟草科技, 2010, 43(3): 5-7.
Li C G, Sun M, Liu Q, et al. Evaluation of practicality of pneumatic cut lamina separation[J]. Tobacco Science & Technology, 2010, 43(3): 5-7.
- [6] 李晓, 熊安言. FX6型就地风选器在梗签风选中的应用[J]. 烟草科技, 2006, 39(8): 9-11.
Li X, Xiong A Y. Application of in site pneumatic sliver classifier FX6[J]. Tobacco Science & Technology, 2006, 39(8): 9-11.
- [7] 陈福. HELIUS激光除杂在制丝生产线异物剔除中的应用[J]. 工业设计, 2016(1): 152-153.
Chen F. Application of HELIUS laser impurity removal in foreign body removal of silk production line[J]. Industrial Design, 2016(1): 152-153.
- [8] 马亚, 杨白凡, 杭建军. 垂直风送片烟多光谱异物剔除系统的设计[J]. 烟草科技, 2015, 48(8): 76-81.
Ma Y, Yang B F, Hang J J. Design of tobacco strip sorting system incorporating multispectral technology and vertical pneumatic separation[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(8): 76-81.
- [9] 高翔, 张超, 陈杰, 等. 关于AEROSORT除杂效果的研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(12): 104-108.
Gao X, Zhang C, Chen J, et al. Study on impurity removal effect of AEROSORT[J]. Food Science and Technology and Economy, 2018, 43(12): 104-108.

- [10] 朱世华. 一种烟草异物剔除装置: CN106820245A[P]. 2017-06-13.
Zhu S H. Tobacco foreign matter removing devices: CN106820245A[P]. 2017-06-13.
- [11] 张乐年, 李健, 朱毅, 等. 烟叶异物剔除系统: CN201848391U[P]. 2011-06-01.
- [12] 张峰, 江家森, 刘泽春, 等. 引入近红外光谱技术的烟草异物剔除装置及其剔除方法: CN101933650B[P]. 2013-08-07.
Zhang F, Jiang J S, Liu Z C, et al. A tobacco foreign object removal device and its removal method using near-infrared spectroscopy technology: CN101933650B[P]. 2013-08-07.
- [13] 董正. 烟丝输送状态视觉检测系统的设计与研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
Dong Z. Design and research of visual inspection system for tobacco conveying state[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [14] 曹计昌, 周建琼. 基于数学形态学的烟支计数识别[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(2): 6-10.
Cao J C, Zhou J Q. Cigarette counting recognition based on mathematical morphology[J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(2): 6-10.
- [15] 吴晓飞. 基于机器视觉的烟支在线检测系统的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2011.
Wu X F. Research on cigarette online detection system based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2011.
- [16] 卢凡. 基于机器视觉的包装机空头烟支检测技术研究[J]. 轻工机械, 2010, 28(2): 65-67, 71.
Lu F. Research on detection technology of the packaging machines loose ends based on machine vision[J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(2): 65-67, 71.
- [17] 张剑. 基于聚类分析的彩色烟支图像的识别与计数[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Zhang J. Recognition and counting of color cigarette images based on cluster analysis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [18] 田秀侠. 基于遗传算法的烟支图像的分割与计数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Tian X X. Research on segmentation and counting of cigarette images based on genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [19] Sheng F, Song S Y, Xia S P. A real-time cigarettes counting and loose ends detection algorithm[C]//2016 IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS), May 28-29, 2016, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2016: 11-15.
- [20] Qu H J, Zhang P J, Zhang K, et al. Research on cigarette filter rod counting system based on machine vision[M]//Fei M R, Ma S W, Li X, et al. Advanced computational methods in life system modeling and simulation. Communications in computer and information science. Singapore: Springer, 2017, 761: 513-523.
- [21] Xiao Z Y. Research and implementation of cigarette defect detection algorithm[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [22] Li J, Lu H H, Wang X, et al. Online inspection system for cigarette tipping quality based on machine vision. Tobacco Science and Technology, 2019, 52(9) 109-114.
- [23] Ying W, Hu X J, Zhao L. Detection of cigarette missing in packing based on deep convolutional neural network [C]//2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), October 3-5, 2017, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2017: 1252-1256.
- [24] Liu H Y, Yuan G W, Yang L, et al. An appearance defect detection method for cigarettes based on C-CenterNet[J]. Electronics, 2022, 11(14): 2182.
- [25] 俞康平, 汪嵘, 孙坚, 等. 烟支视觉检测的图像信息采集装置: CN217084737U[P]. 2022-07-29.
Yu K P, Wang R, Sun J, et al. Image information acquisition device for cigarette visual detection: CN217084737U[P]. 2022-07-29.
- [26] 王泽栋. 一种烟支外观缺陷视觉检测系统: CN214408724U[P]. 2021-10-15.
Wang Z D. A visual inspection system for cigarette appearance defects: CN214408724U[P]. 2021-10-15.
- [27] 陶徐. 机器视觉在烟盒包装检测中的应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
Tao X. Application of machine vision in cigarette package detection[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
- [28] 刘浩, 贺福强, 李荣隆, 等. 基于机器视觉的卷烟小盒商标纸表面缺陷在线检测技术[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(5): 54-59.
Liu H, He F Q, Li R L, et al. On-line detection technology of label paper surface defects of small cigarette packs based on machine vision[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(5): 54-59.
- [29] 陈同宇, 陈洋, 范剑伟. 改进 YOLOv3 算法的烟盒缺陷检测[J]. 物联网技术, 2021, 11(4): 51-52, 55.
Chen T Y, Chen Y, Fan J W. Improved YOLOv3 algorithm for cigarette case defect detection[J]. Internet of Things Technologies, 2021, 11(4): 51-52, 55.
- [30] Xu Z J, Guo S X, Li Y F, et al. Cigarette packaging quality inspection based on convolutional neural network [M]//Sun X, Zhang X, Xia Z, et al. Adaptive intelligence and security. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2022, 13338: 614-626.
- [31] 王岩松. 从缺陷检测到质量控制: 药包/彩盒印刷质量缺陷视觉检测方案[J]. 印刷技术, 2013(18): 70-71.
Wang Y S. From defect detection to quality control—visual inspection scheme for printing quality defects of medicine pack/color box[J]. Printing Technology, 2013(18): 70-71.
- [32] 陈俊. 一种烟盒外观检测设备: CN202074946U[P]. 2011-12-14.
Chen J. A cigarette box appearance inspection equipment: CN202074946U[P]. 2011-12-14.
- [33] 张玉民. 智能卷烟小包外观检测设备: CN216834428U [P]. 2022-06-28.
Zhang Y M. Intelligent cigarette bag appearance inspection equipment: CN216834428U[P]. 2022-06-28.

- [34] 胡兴锋, 朱立军, 吕祥敏, 等. 一种卷烟盒外观缺陷检测系统: CN111929316A[P]. 2020-11-13.
Hu X F, Zhu L J, Lü X M, et al. A cigarette box appearance defect detection system: CN111929316A[P]. 2020-11-13.
- [35] 陆健. 基于机器视觉与光电技术的GD小包烟支检测系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
Lu J. Research on GD small pack cigarette detection system based on machine vision and photoelectric technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [36] 李阳萱. 烟草异物图像检测技术研究及仿真[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
Li Y X. Research and simulation of tobacco foreign body image detection technology[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [37] 沈文超. 基于颜色模型的烟草异物识别算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Shen W C. Research on tobacco foreign body recognition algorithm based on color model[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [38] 周首峰. 基于图像处理的烟叶成熟度检测技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Zhou S F. Research on tobacco maturity detection technology based on image processing[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [39] 胡龙. 基于机器视觉的烟支缺陷自动检测技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Hu L. Research on automatic detection technology of cigarette defects based on machine vision[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [40] 曹成坤. 基于图像处理的表面质量检测研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
Cao C K. Research on surface quality detection based on image processing[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [41] Kittler J. On the accuracy of the Sobel edge detector[J]. *Image and Vision Computing*, 1983, 1(1): 37-42.
- [42] Torre V, Poggio T A. On edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(2): 147-163.
- [43] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [44] 庄珍珍. 基于机器视觉的烟叶自动分级方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
Zhuang Z Z. Research on automatic tobacco grading method based on machine vision[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [45] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//*Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, September, 1988, Manchester, UK. Alvey: Alvey Vision Club, 1988: 147-151.
- [46] Shi J. Good feature to track[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 21-23, 1994, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 1994: 593-600.
- [47] 刘艳莉, 桂志国. 基于形态学的可变权值匹配自适应图像增强算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1285-1291.
Liu Y L, Gui Z G. Adaptive image enhancement algorithm with variable weighted matching based on morphology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1285-1291.
- [48] 朱晓临, 陈嫚, 李雪艳, 等. 结合形态学变形虫和复合颜色空间的彩色图像边缘检测模型[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(7): 1060-1066.
Zhu X L, Chen M, Li X Y, et al. A color image edge detection model with morphological amoebas and two kinds of color spaces[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(7): 1060-1066.
- [49] 陈嫚, 朱晓临, 李雪艳, 等. 改进的模糊形态学彩色图像边缘检测算法[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(8): 922-927.
Chen M, Zhu X L, Li X Y, et al. Improved color image edge detection algorithm based on fuzzy mathematical morphology[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2014, 37(8): 922-927.
- [50] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, SMC-3(6): 610-621.
- [51] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 2002: 1150-1157.
- [52] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [53] 邵素琳. 基于机器视觉的烟叶梗茎检测与烟叶类型识别方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Shao S L. Research on tobacco stem detection and tobacco type identification method based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [54] 崔云月. 烟支外观质量检测算法的研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
Cui Y Y. Research and application of cigarette appearance quality detection algorithm[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [55] 李瑞丽, 刘玉叶, 李文伟, 等. 利用近红外光谱技术快速检测配方烟丝掺配均匀性[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 83-87.
Li R L, Liu Y Y, Li W W, et al. Study on rapid determination of tobacco blending uniformity by Near Infrared Spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(5): 83-87.
- [56] Sahu A, Dante H. Non-destructive rapid quality control method for tobacco grading using visible near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10656: 1065603.
- [57] Marcelo M C A, Soares F F, Ardila J A, et al. Fast inline tobacco classification by near-infrared hyperspectral

- imaging and support vector machine-discriminant analysis [J]. Analytical Methods, 2019, 11(14): 1966-1975.
- [58] Divyanth L G, Chakraborty S, Li B, et al. Non-destructive prediction of nicotine content in tobacco using hyperspectral image-derived spectra and machine learning [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2022, 47(2): 106-117.
- [59] Duan J, Huang Y, Li Z H, et al. Determination of 27 chemical constituents in Chinese southwest tobacco by FT-NIR spectroscopy[J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 21-26.
- [60] 牛群峰, 袁强, 靳毅, 等. 基于改进 VGG16 卷积神经网络的烟丝类型识别[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(9): 149-154.
- Niu Q F, Yuan Q, Jin Y, et al. Tobacco type recognition based on improved VGG16 convolutional neural network[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(9): 149-154.
- [61] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
- [62] Szegedy C, Liu W, Jia Y Q, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [63] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[EB/OL]. (2014-09-04)[2023-03-02]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>.
- [64] Zeng T, Liu Y X, Jiang Y F, et al. Advanced Materials Design for Adsorption of Toxic Substances in Cigarette Smoke [J]. ADVANCED SCIENCE, 2023, 10(22): 2301834.
- [65] 高震宇, 王安, 董浩, 等. 基于卷积神经网络的烟丝物质组成识别方法[J]. 烟草科技, 2017, 50(9): 68-75.
- Gao Z Y, Wang A, Dong H, et al. Identification of tobacco components in cut filler based on convolutional neural network[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(9): 68-75.
- [66] 胡世龙, 陈建强, 赖东辉, 等. 基于机器视觉的不合格叶梗烟丝检测方法[J]. 计算机应用, 2019, 39(S1): 215-218.
- Hu S L, Chen J Q, Lai D H, et al. Method for detecting unqualified leaf stem tobacco based on machine vision[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(S1): 215-218.
- [67] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [68] Graham B. Fractional max-pooling[EB/OL]. (2014-12-18)[2023-03-02]. <https://arxiv.org/abs/1412.6071>.
- [69] 门超. 包装印刷检测的新篇章: 机器视觉[J]. 印刷杂志, 2017(8): 59-61.
- Men C. A new chapter of packaging printing inspection: machine vision[J]. Printing Field, 2017(8): 59-61.
- [70] 李致金, 李培秀, 朱超. 基于深度学习的标签缺陷检测系统应用[J]. 现代电子技术, 2019, 42(7): 153-156.
- Li Z J, Li P X, Zhu C. Application of label defect detection system based on deep learning[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(7): 153-156.
- [71] 李珍珍. 产品表面的无监督缺陷检测算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- Li Z Z. Research on unsupervised defect detection algorithm of product surface[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [72] 单宇翔, 龙涛, 楼卫东, 等. 基于深度学习的复杂场景中卷烟烟盒检测与识别方法[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(5): 71-80.
- Shan Y X, Long T, Lou W D, et al. A detection and recognition method of cigarette cases in complex scene based on deep learning[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(5): 71-80.
- [73] 张文静. 基于卷积神经网络的烟草病害识别与检测[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- Zhang W J. Identification and detection of tobacco diseases based on convolutional neural network[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [74] 张文静, 孙秀朋, 乔永亮, 等. 基于 InceptionV3 的烟草病害识别[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(5): 61-70.
- Zhang W J, Sun X P, Qiao Y L, et al. Tobacco disease identification based on InceptionV3[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(5): 61-70.
- [75] 谢裕睿, 苗晟, 张铄, 等. 基于残差神经网络的烟草病害识别研究[J]. 现代计算机, 2020(30): 27-31.
- Xie Y R, Miao S, Zhang S, et al. Research on tobacco disease identification based on residual neural network[J]. Modern Computer, 2020(30): 27-31.
- [76] 王平. 基于迁移学习的烟草叶片病情识别[J]. 变频器世界, 2018(10): 77-80, 89.
- Wang P. Identification of tobacco leaf disease based on transfer learning[J]. The World of Inverters, 2018(10): 77-80, 89.
- [77] 余佳杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 基于结构光视觉和光照模型的焊缝表面质量检测[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602019.
- Yu J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Weld surface quality detection based on structured light vision and illumination model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602019.
- [78] 刘昌文, 段发阶, 李杰, 等. 线结构光三维传感器扫描方向标定方法[J]. 中国激光, 2023, 50(5): 0504001.
- Liu C W, Duan F J, Li J, et al. A scanning direction calibration method of line-structured light three-dimensional sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(5): 0504001.
- [79] 张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1214002.
- Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1214002.