

基于多光谱融合的果蔬表面农残视觉检测系统优化研究

王贵申 丁革媛

沈阳工业大学

DOI:10.12238/acair.v3i3.15569

[摘要] 针对果蔬表面农药残留快速检测需求,本研究提出了一种基于多光谱融合的视觉检测系统优化方法。通过引入改进的深度卷积神经网络和Transformer混合架构,实现了多光谱图像特征的精准提取;采用自适应加权融合算法结合改进核主成分分析,有效提升了光谱数据融合质量。在系统效率优化方面,设计了基于CUDA的并行计算架构和异构硬件配置方案,显著提高了检测速度。同时,通过冗余硬件设计、智能容错机制和优化数据传输协议,增强了系统稳定性。

[关键词] 多光谱融合; 果蔬表面; 农残视觉检测; 系统优化

中图分类号: N945.15 文献标识码: A

Optimization of visual detection system for pesticide residues on fruit and vegetable surfaces based on multispectral fusion

Guishen Wang Geyuan Ding

Shenyang University of Technology

[Abstract] In response to the demand for rapid detection of pesticide residues on the surface of fruits and vegetables, this study proposes an optimized method for visual detection system based on multispectral fusion. By introducing an improved deep convolutional neural network and Transformer hybrid architecture, accurate feature extraction of multispectral images has been achieved; The use of adaptive weighted fusion algorithm combined with improved kernel principal component analysis effectively improves the quality of spectral data fusion. In terms of system efficiency optimization, a parallel computing architecture based on CUDA and heterogeneous hardware configuration scheme have been designed, significantly improving detection speed. At the same time, system stability has been enhanced through redundant hardware design, intelligent fault-tolerant mechanisms, and optimized data transmission protocols.

[Key words] multispectral fusion; Surface of fruits and vegetables; Visual inspection of pesticide residues; system optimization

引言

农产品质量安全是关乎国计民生的重要议题,其中果蔬表面农药残留检测一直是行业技术难点。传统检测方法如色谱分析法虽精度较高,但存在设备昂贵、操作复杂、检测周期长等局限性,难以满足现代农业生产中快速、无损的检测需求。近年来,基于多光谱成像的视觉检测技术因其非接触、高效率的特点展现出良好应用前景,但在实际推广中仍面临检测精度不足、环境适应性差、系统稳定性欠佳等技术瓶颈。本研究立足于多光谱融合技术,通过创新性地结合深度学习方法与硬件系统优化,致力于构建一套高效、精准、稳定的果蔬农残视觉检测系统。

1 多光谱融合技术的原理

多光谱融合技术融合不同波段光谱信息,可实现对果蔬表

面农残的多维度检测。该技术的核心是利用光谱成像技术,捕捉特定波段(可见-近红外)的反射和荧光性质。例如,在可见光范围内,主要反映了色素的分布及表面形貌;而在近红外波段,对有机分子的振动非常敏感,能够捕捉到农药分子的特征吸收峰。利用分光器件与高灵敏CCD/CMOS器件的协同工作,实现对空间、光谱等多维信息的同步采集,为后续特征提取奠定基础。

在光谱融合方面,本项目重点研究基于特征层的自适应加权融合方法。首先,通过暗电流校正、辐射校正、几何配准等方法,消除设备噪声与消除空间漂移。在此基础上,利用PCA、ICA等方法,对农作物残的特征进行降维,提取敏感的特征波段。本项目的创新之处是将注意力机制引入到波段权重分配模型中,利用卷积神经网络自动学习各个波段对农残的贡献,实现可见光纹理特征和NIR分子特征的优势互补。与传统的简单加权或者

波段叠加方法相比,该方法能够有效地抑制数据冗余,提高检测的信噪比^[1]。

其优势在于:(1)多维特征融合突破单一光谱检测的局限性,如:有机磷农药在550nm无特征而近红外吸收明显。(2)利用空谱联合分析技术,实现对农残和果蔬天然纹理的干扰识别;(3)利用局部对比度增强算法,实现微米级残留斑点的突显。(4)融合特征向量更适用于机器学习模型处理,利用SVM和轻量级移动神经网络等方法实现高效分类。通过本项目的研究,将重点解决波段选择和融合算法的实时性问题,使之适用于流水线式动态探测场景,为构建低时延高精度在线探测系统提供关键技术支撑。

2 基于多光谱融合的果蔬表面农残视觉检测系统问题分析

2.1 检测精度问题

目前,基于多光谱融合技术的果蔬农残检测方法在准确性方面还存在诸多问题。在特征提取方面,由于果蔬表面纹理复杂、天然缺陷多、农药残留分布不均等特点,传统的人工设计方法很难将其从背景干扰中分离出来。尤其在可见光范围内,由于果蔬自身色泽的变化,极易掩盖痕量农药的可视特征;而对某些有机物敏感的近红外波段易受含水量、光泽度等因素的影响。在这种复杂背景下,单纯的边缘检测和纹理分析方法往往无法有效地表征特征,从而影响后续分类效果。

在多光谱遥感影像融合中,也有一定的优化空间。已有的主分量分析、波段加权平均等融合方法虽可实现数据降维,但在选择特征时,易丢失对特定农药敏感的窄波段光谱信息。例如,一些OPs在特定的窄波段内存在特征吸收峰,而传统的宽谱段融合方法可能会弱化这一特性。此外,多谱道之间信息冗余问题也没有得到有效解决,既浪费了计算资源,又降低了检测的实时性。如何构建自适应权重分配机制,对关键谱特征进行智能化筛选和互补融合,是提升系统性能的重要突破口^[2]。

另外,训练样本的标注质量也是限制检测精度的一个重要因素。农残检测依赖于高精度的标签数据,而目前的标签标注过程主要依赖于人工判读,且受人员经验及检测设备灵敏度等因素的影响,标注结果具有较大的主观性。尤其是当农残浓度较低或混合农药时,很难通过人工标记来保证其一致性。这类有标签噪声的存在会导致模型学习错误的特征关联,在实际应用中存在泛化能力不强的问题。探索基于半监督学习的数据优化方法,或者联合高精度质谱检测结果,是提高数据质量的有效途径。

2.2 系统效率问题

基于多光谱融合技术的果蔬农残检测系统在实际应用中存在着系统效率低的问题。目前的主流算法在处理高维多光谱数据的时候,往往要经历复杂的特征提取、降维和分类等过程,计算量呈指数级增长。尤其在深度学习算法中,由于参数数目大、矩阵计算量大,即使采用GPU加速,单个检测时间仍然很难满足流水线作业的实时需求。在批量检测的情况下,这一计算时延进一步增大,严重影响了检测的整体效率。但现有算法多采用固定

的计算框架,无法根据实际需求对算法进行动态调整,导致资源浪费^[3]。

硬件资源配置不合理也是一个突出的问题。多光谱成像系统通常包含多个光学传感器与数据处理单元,而实际部署过程中往往存在资源分配不平衡的问题。主要表现为:图像获取和运算速度不匹配,造成数据堆积或处理器闲置;当一些传统的算法运行到GPU上的时候, GPU的利用率就会受到很大的限制。这种不均衡的资源分布不仅会减少系统的吞吐量,而且会增加能量消耗,缩短设备的使用寿命。更重要的是,现有体系结构多采用通用计算平台,不能针对多光谱数据处理特点进行针对性的优化,无法充分发挥其硬件潜力。

在长时间连续运行的情况下,系统的稳定性问题更加突出。多光谱相机各光学元件在检测环境中会产生微小的偏差,造成光谱数据漂移。同时,在大容量的数据传输过程中,由于受到电磁干扰的影响,会导致数据丢包或校验错误。在器件层次上,长时间的高负载运行会引起存储器的散热不佳、存储器泄露等问题,最终导致系统崩溃或者检测精度降低。在实验室条件下,这些缺陷很难被发现,而当其实际应用时,将严重影响系统的可靠性和用户体验。如何构建具有自诊断、自适应性、鲁棒性的体系结构是目前亟需解决的关键技术问题。

3 基于多光谱融合的果蔬表面农残视觉检测系统优化策略

3.1 提升检测精度策略

创新性地应用深度学习对提高多光谱融合检测果蔬农残的准确性具有重要意义。本项目针对传统特征提取方法对农残小区域响应不强的问题,基于注意力机理,构建多尺度卷积神经网络,实现对农药残留弱信号的局部增强。特别地,在光谱序列数据处理中引入了Transformer结构,其自注意机制可以有效地刻画不同波段之间的长时相关性,在识别农药分子方面优于传统卷积神经网络。考虑到实际应用中样本数量有限,本项目拟采用迁移学习策略,以大样本多光谱数据为样本,对模型进行微调,使其自适应于农残检测任务,在保证特征表征能力的前提下,避免过拟合的风险。

光谱数据融合方法的优化需突破传统固定权重融合的局限性。在此基础上,设计基于特征重要度的动态加权融合算法,分析不同波段对目标农药的敏感性差异,自动进行权重分配。比如,针对OPs,我们将增加特征吸收波段的权系数,并利用改进的核主元分析方法对光谱数据进行非线性降维,以保留最重要的光谱特征。这种自适应融合策略在避免关键特征丢失的情况下,有效地解决了信息冗余性问题。在此基础上,本项目拟引入多模态学习框架,实现光谱和纹理的跨模态关联,构建更加全面的农残表征模型。

为了提高标注质量,必须建立标准化的标注系统。一方面,建立完善的农药残留标识规范,明确不同浓度等级、分布形态的标识标准;另一方面,通过高精度显微成像技术辅助标注,降低人为误差。在此基础上,研究基于主动学习的半自动化标注系统,

对不确定样本进行迭代训练,筛选出不确定样本,提交专家复核,显著提高标注效率。同时,结合生成式对抗网络的数据增强方法,在保证光谱特征真实度的同时,增强样本的多样性,提高模型的泛化能力。本项目拟采用人工标注和智能算法相结合的方法,解决传统方法存在的标注一致性不高等问题,为模型训练提供更加可靠的数据支撑^[4]。

3.2 提高系统效率策略

为提高多谱融合农残检测系统的性能,需从计算框架与并行处理两个方面进行突破。本项目拟采用模块化设计思想,将特征提取、数据融合、分类识别三个环节分离,并在CUDA框架下实现GPU并行加速。特别是针对卷积计算、矩阵分解等计算密集型运算,通过优化线程块分配与共享存储空间,大幅提高计算吞吐率。在此基础上,本项目提出一种动态计算路径选择机制,根据输入数据的复杂性自动调整算法深度,避免对简单样本做不必要的复杂操作,实现计算资源的智能化配置。

硬件结构的优化需要建立算法和硬件的协同设计思想。针对多光谱数据处理的特点,本项目拟采用异构计算体系结构,结合高性能图像采集卡与GPU计算单元,实现实时预处理, GPU负责深度学习推理。在存储子系统中,采用分层存储策略,将高频接入的频谱特征信息存储在GPU中,将历史探测到的数据存储到大容量SSD中。在此基础上,设计硬件参数模板,利用软件自定义方式,对图像传感器增益、曝光时间等关键参数进行动态调节,实现对硬件资源的优化调度。

要提高系统的稳定性,就必须从两个方面着手,一是硬件冗余,二是软件容错。硬件方面,采用双电源冗余及热插拔模块结构,保证了系统在关键零部件发生故障的情况下仍能正常工作。在数据传输方面,对原USB或CameraLink进行了优化,并引入了数据校验的重传机制以及流量控制算法,以避免由于数据包丢

失而造成的检测中断。该软件集成了实时健康监控功能,通过对运行参数(如温度、存储器占用等)的分析,对潜在故障进行预测,并对异常情况进行自适应降级操作。同时,构建日志分析系统,挖掘历史数据,不断优化系统参数,形成稳定提升良性循环。

4 结语

多光谱融合技术在果蔬农残检测中具有明显优势,但在实际应用中仍然面临着检测准确性、系统效率和环境适应性等多方面的挑战。为此,本项目拟从深度学习算法优化、光谱自适应融合策略、智能数据标记系统构建、硬件体系结构协同设计等三个方面展开系统研究。具体而言,本项目拟通过算法并行重构与异构计算体系结构的创新应用,提高检测速度;同时,通过引入冗余设计及智能容错机制,使系统具有更强的健壮性。本项目的研究成果不仅可以突破现有技术瓶颈,还将为农产品品质安全检测向智能化方向发展提供新思路。

参考文献

- [1] 张天泷,耿远超,廖予祯,等.多光谱目标检测算法及相关数据集综述[J].强激光与粒子束,2025,37(05):5-22.
- [2] 张丽丽,栗相如,刘佳辉,等.多尺度多特征融合的多光谱图像压缩网络[J/OL].中国激光,1-17[2025-06-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20250409.1136.014.html>.
- [3] 李杰.基于多光谱图像智能分析技术的输电设备检测系统研发[D].杭州电子科技大学,2025.
- [4] 杨健,刘宇,李敬岩,等.现代光谱融合分析技术研究进展与展望[J].化学进展,2024,36(12):1874-1892.

作者简介:

王贵申(2000--),男,汉族,辽宁省大连市人,本科,研究方向:机器视觉。