

## 水果品质光学无损检测技术研究进展

马佳佳, 王克强

### Research Progress of Optical Nondestructive Testing Technology for Fruit Quality

MA Jiajia and WANG Keqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110235>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展

Research Progress of Non-destructive Detection Technique in Fruit Quality Evaluation

食品工业科技. 2020, 41(24): 354-359

#### 水果成熟度近红外光谱及高光谱成像无损检测研究进展

Research Progress on Nondestructive Detection of Fruit Maturity by Near Infrared Spectroscopy and Hyperspectral Imaging

食品工业科技. 2021, 42(20): 377-383

#### 芒果品质无损检测技术研究进展

Progress of Non-destructive Testing Technology in Mango Quality

食品工业科技. 2021, 42(22): 413-422

#### 基于近红外高光谱成像快速无损检测注胶肉研究

Rapid Nondestructive Detection of Glue-injected Meat by NIR Hyperspectral Imaging Technology

食品工业科技. 2020, 41(10): 219-223

#### 基于高光谱成像技术的鸡蛋哈氏单位快速无损检测

Rapid and nondestructive detection of egg's haugh unit based on hyperspectral implantation

食品工业科技. 2018, 39(2): 245-249

#### 苹果品质高光谱成像检测技术研究进展

Progress of hyperspectral imaging detection technology in apple quality

食品工业科技. 2017(10): 389-394



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马佳佳, 王克强. 水果品质光学无损检测技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 427-437. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110235

MA Jijia, WANG Keqiang. Research Progress of Optical Nondestructive Testing Technology for Fruit Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 427-437. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110235

# 水果品质光学无损检测技术研究进展

马佳佳<sup>1</sup>, 王克强<sup>2,\*</sup>

(1. 仲恺农业工程学院机电工程学院, 广东广州 510225;

2. 仲恺农业工程学院自动化学院, 广东广州 510225)

**摘要:** 在水果产量巨大和需求标准提高的双重影响下, 目前亟需研究方便快捷的水果无损检测方法。本文主要介绍机器视觉、近红外光谱检测、拉曼光谱检测和高光谱成像技术共四种光学无损检测技术在水果品质检测中的应用, 对水果品质光学无损检测研究历程和发展现状进行归纳整理, 同时展望了未来发展方向, 为水果品质光学无损检测研究工作提供基础理论参考。

**关键词:** 水果, 品质, 无损检测技术, 机器视觉, 近红外光谱检测, 拉曼光谱检测, 高光谱成像技术

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)23-0427-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110235



本文网刊:

## Research Progress of Optical Nondestructive Testing Technology for Fruit Quality

MA Jijia<sup>1</sup>, WANG Keqiang<sup>2,\*</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

2. College of Automation, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

**Abstract:** Under the dual influence of the huge fruit yield and increased demand standard, it is urgent to find a convenient and efficient nondestructive testing method for fruit quality. The paper mainly introduces the application of four kinds of optical nondestructive testing technology in fruit quality testing, including the machine vision technology, the near infrared spectroscopy, Raman spectroscopy and hyperspectral imaging technology, and the research process and development status of optical nondestructive testing technology for fruit quality are summarized and sorted in this paper. At the same time, the future development direction is prospected, so as to provide basic theoretical reference for the research work of optical nondestructive testing for fruit quality.

**Key words:** fruit; quality; nondestructive testing technology; machine vision technology; near infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; hyperspectral imaging technology

我国是水果生产大国, 水果产量与种植面积均位于世界前列<sup>[1-2]</sup>。近年来国内水果产业已经成为我国种植业中的第三大支柱产业, 与此同时我国水果产量已达到全球生产总量的 15% 以上<sup>[3]</sup>。随着经济的发展和整体消费水平的提高, 消费者对果品品质的要求逐渐提高, 在产量巨大和需求标准提高的双重影响下, 如何通过方便快捷的水果无损检测手段以实现准确的品质分级是目前水果产业研究学者亟需思考的<sup>[4]</sup>。传统检测方法是人工结合机械进行, 存

在检测效率低、准确度不高等问题, 很难满足生产需求。近年来, 无损检测方法因其快速、简便、高效的优点, 被国内外学者广泛关注, 也越来越多地被应用于水果品质的检测研究中<sup>[5]</sup>。

无损检测技术又称为非破坏性检测, 是在不损坏样本的前提下实现品质检测的一种方法。该方法在获取样品信息的同时保证了样品的完整性, 检测速度较传统的理化方法有很大提升, 且能有效地判断出从外观无法获得的样品内部品质信息。目前常用的

收稿日期: 2020-11-24

基金项目: 广东省科技计划项目(2017A040405056); 广东省研究生教育创新计划项目(KA200192346)。

作者简介: 马佳佳(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 机器视觉, E-mail: 840453281@qq.com。

\* 通信作者: 王克强(1968-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 人工智能, E-mail: wangkq2003@126.com。

无损检测技术大多利用待测物在光学、声学、力学、电磁学等相关物理特性上的表征来实现检测<sup>[6]</sup>,不同的无损检测技术都有其各自的优点与适用条件,正确认识和总结不同无损检测技术的优点与局限性对水果的检测与生产具有重要意义。

水果品质包括外部品质和内部品质,外部品质的主要检测指标包括果实大小、形状、色泽、表面缺陷和损伤等,利用机器视觉技术结合图像处理算法对水果外观品质进行检测是目前国际上正在研究的热点课题<sup>[7]</sup>。内部品质检测指标包括果实的酸度、甜度、水分、维生素含量、可溶性固形物含量等,可以通过光学、声学、电磁学等相关方法进行检测。但无论对于水果的外部品质或是内部品质,光学无损检测技术包括机器视觉、近红外光谱检测、拉曼光谱检测和高光谱成像技术都可以取得一定检测效果,且目前这些方法均已获得广泛应用<sup>[8]</sup>。本文将分别介绍这四种光学无损检测技术在水果无损检测中的应用,对其研究历程和发展现状进行归纳整理,同时展望未来发展方向,为水果品质光学无损检测研究工作提供基础理论参考。

## 1 机器视觉

### 1.1 概述

早在上世纪70年代,国外学者就开始将机器视觉技术与图像处理技术结合应用于水果的外部品质无损检测研究中。机器视觉技术是通过摄像机来获取物体图像后,通过结合图像处理技术实现对物体的识别和检测。该技术模仿了人类感官中的视觉,属于一种智能感官仿生技术。因具有高效、无损、分级指标多、检测结果客观准确等优势目前正被广泛地研究和应用。一般来说,机器视觉系统主要由光源、工业摄像机、图像采集卡、图像处理器和显示器等组成图像采集、处理和分析、信息输出这三部分主要内容<sup>[9]</sup>。设计合理的硬件设备采集样本图像后,选用合适的图像处理算法可以提取得到样本表面的各种特征信息,包括尺寸、形状、颜色及表面缺陷等。

### 1.2 分部检测

1.2.1 图像采集 为提高水果无损检测的稳定性,首先必须获取到可提取有效特征信息的水果样本图像。而对于大多数形态为类球形的水果来说,采用机器视觉技术对其进行无损检测过程中需要优先解决的一个重要问题是如何获取果实样本不同面的图像,许多学者通过以下两种基本思路开展研究。

1.2.1.1 旋转待测果实 一种直接的思路是通过调整待测物的位置获取得到多角度图像。美国一家农业科技公司<sup>[10]</sup>首先设计了一款苹果分拣机械,采用带有滚轮装置的传送带使苹果在运输的过程中进行翻转,同时利用多区域扫描摄像机对全传送带上的大量苹果进行图像采集,再通过多视角图像合成即可得到果实的几乎所有侧面信息。但由于大量苹果的形状与大小各不相同,旋转的速度与方向不一致,通过

多区域扫描摄像机可能造成信息的冗余。此外,苹果旋转轴线两端的表面部分摄像机无法采集到,使得分级准确率达到理想水平。日本新岛大学的科研团队<sup>[11]</sup>开发了一套完整的图像数据采集系统,系统由旋转平台、电荷耦合摄像机(charge coupled device, CCD)、图像处理器和微型计算机组成。利用旋转平台使置于平台上的苹果发生旋转,每旋转18°时置于侧面的CCD摄像机采集到一幅图像,直至苹果旋转一整周,可获取到共20幅图像。每幅图像仅保留中间部分进行图像合成,可得到一颗苹果的全表面展开图像。该方法可以很好获取到水果的全表面信息,但需人为地将果实一个个放置在旋转平台上,若结合机械臂进行自动化拾取放置会取得不错的效果。土耳其Süleyman Demirel大学的Sofu团队<sup>[12]</sup>设计了一种以颜色、大小、重量作为指标的苹果质量检测系统,通过滚筒刷和两台CCD摄像机能够获取苹果四个面的图像。缺陷在于虽然较小的苹果可以很容易地旋转,但较大的苹果可能由于与滚筒形成滚轮结构而不能旋转,因此要获取完整的苹果四面图像是非常困难的。总体来说,通过旋转待测果实进行图像采集稳定性较差,特别是针对形状不规则的水果。

1.2.1.2 镜面反射 近年来有部分学者考虑利用镜面反射优化图像采集设备,例如中国农业大学的李庆中团队<sup>[13]</sup>设计了一套苹果颜色在线检测系统,输送带设计为琴键式结构,每个果框为倒梯形,果框两侧贴有与水平面成45°的两面平面镜,使果实在运输过程中,位于果实正上方的摄像机可以一次获取到每个果实的三面彩色图像,可基本保证颜色检测的全面性要求。王干等<sup>[14]</sup>设计了一套脐橙采后田间分级系统,基于机器视觉能够获取脐橙的尺寸、表面缺陷数量及缺陷面积,对果品进行自动分级。为了获取脐橙表面信息同时减少镜面反射,选择条形无频闪发光二极管(light-emitting diode, LED)光源前光照明和漫反射光照,通过在暗箱顶部和两侧各设置相机,结合安装有轱辘-齿轮装置的传送带使脐橙在图像采集区域不断旋转,利用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制完成对同一个脐橙9副不同面图像的采集。以上研究表明,通过镜面反射获取果实多面图像可行性较高,在稳定性上表现也相对较好。截至目前,虽然基于机器视觉的水果外观品质检测有着精确、高效的优点,但在图像采集方面还存在一定不足,合理的检测系统设计,既便于得到全面的表面信息,同时能提高检测效率。

1.2.2 前景分割 球状的水果在集中光源的照射下容易造成表面亮度不均匀,如何将果实前景从背景中分割出来是在获取特征之前的一个重要课题。密歇根州立大学的Mizushima等<sup>[15]</sup>提出了一种基于线性支持向量机(support vector machine, SVM)和Otsu阈值分割算法的自适应颜色分割方法,使用线性SVM计算得到图像在RGB空间中的最佳分离超平

面,从而生成灰度图像。通过在水果边界区域附近找到的最小阈值估计得到最佳阈值,解决了由于光照不均难以准确完成前景分割的问题。上海交通大学与北京农业智能装备研究中心<sup>[16]</sup>合作设计了一套使用自动亮度校正的苹果缺陷检测系统,利用朗伯定律即果实对象中央部分与边缘部分的吸光强度不同分别对两部分进行亮度校正,结合相关向量机(relevance vector machine, RVM)分类器较好地解决了因亮度分布不均以及真实缺陷与茎、花萼之间存在相似性而难以检测出准确缺陷区域的问题。伊朗库尔德斯坦大学 Baigvand 团队<sup>[17]</sup>针对无花果设计了一套基于机器视觉的分级系统,质量分级指标选用颜色、尺寸和开裂尺寸,结合无花果加工专家对样本进行的真实等级确定,将无花果质量分为 5 个等级。该系统选用 RGB 空间中的 B 通道图像,采用 Otsu 阈值分割算法,结合形态学图像处理方法,分割出无花果目标区域,得到 RGB 图像掩膜用于后续提取颜色特征。实验结果表明,该系统对无花果进行分级的总精度高于 95%,平均速度为 90 kg/h,可以实现对无花果品质的实时检测。王干等<sup>[14]</sup>在脐橙采后田间分级系统中,为了完整分割出脐橙的目标区域,根据脐橙外观颜色特点同样采用了 RGB 颜色空间,通过 R 分量图像减去 B 分量图像,得到前后景差异明显的灰度图像,以此实现前景分割。前景分割与边缘检测效果息息相关,有时在果实不规则形状或周边环境的干扰下,边缘检测效果达不到预期,这就需要学者们对算法再做创新,进一步增强检测系统的稳定性与适应性。

**1.2.3 尺寸检测** 水果的外形尺寸是果实检测的一项重要依据,一般来说可以通过图像处理计算平均果径大小或最大横截面直径来提取相关尺寸指标。中国农业大学的籍保平教授等<sup>[18]</sup>用苹果图像的直径、轴向或径向的最大尺寸作为尺寸指标,可以达到基本的检测精度要求。陈艳军等<sup>[19]</sup>设计了一套基于机器视觉技术的苹果分选系统,在提取图像中苹果轮廓后,提出以苹果轮廓线上两点之间的最大距离或以最大横切面直径这两种理论模型作为苹果的尺寸分级指标,使用 VC 编程分别建立模型。试验结果表明,利用轮廓线上最大两点间距离对苹果进行大小分级的正确率达 93.3%,利用最大横切面直径进行分级的正确率为 87.1%,证明用果品图像轮廓线上点的最大距离作为尺寸分级指标效果较好,且分机效率最高可达 12 个/s,达到水果在线分选商品化应用的基本要求。但由于全套设备体积较大,成本较高,暂时未能得到广泛应用。王干等<sup>[14]</sup>在脐橙采后田间分级系统中,根据国家脐橙分级标准以最小果径作为分级依据,通过最小外接矩形法得到图像中脐橙对象最长轴和最短轴,结合相机标定结果与脐橙实际尺寸等级,建立了图像中脐橙对象轴长与脐橙实际大小之间的相关模型,以此获得脐橙尺寸预测结果。试验结果表

明,对脐橙尺寸的检测误差小于 3%,对单幅图片的平均检测时间小于 30 ms,可以实现脐橙的田间分级检验。而沈阳农业大学的石瑞瑶等<sup>[20]</sup>设计了一套苹果品质在线分级系统,系统采用阈值分割算法完成前景分割后,使用逐像素遍历法提取得到苹果的外部轮廓,计算重心到外边缘轮廓各个像素点的距离,并取其平均值作为果径特征,实验结果表明系统分级准确率达 95%。李顺琴等<sup>[21]</sup>基于机器视觉技术,设计了橙子实时分级系统。该系统提取橙子尺寸、颜色和表面缺陷作为特征采用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络算法实现分级。利用橙子普遍为椭球形的特性选择用图像中的果径来反映果实的实际大小。该系统对各级橙子的识别平均准确率为 86.3%,基本实现对橙子的自动化检测和分级。陕西科技大学李硕等<sup>[22]</sup>研究了苹果的在线分级,采用最小外接圆法从图像中得到苹果对象最大横截面半径作为尺寸特征,建立果品实际半径与图片中计算得最大横截面半径的相关方程,也取得了不错的检测效果。总体来看,检测果实尺寸大小的方法大同小异,在选取特定的尺寸指标后结合简单的数据模型即可获取待测果实的尺寸信息。

**1.2.4 形状检测** 果品的外观形状也是影响水果品质的重要因素之一,成熟水果的外形各异,有时很难用具体的某一种形状来进行说明。Momin 等<sup>[23]</sup>研究了一种以芒果几何形状作为分级指标的芒果自动分级技术,提出了一种基于区域全局阈值颜色分割处理算法。算法采用 HSI 颜色空间,结合中值滤波和形态学分析得到芒果在图像中表现出的投影面积、周长和圆度特征值。与灰度图像相比,基于区域的全局阈值颜色分割方法可以获得更多像素级别的信息,并搜索具有相似像素特征值的像素。在获取特征部分,系统通过计算图像中对象边界内的像素数及连接对象轮廓的边界像素数,分别与图像分辨率值相乘得到投影面积和周长。系统将芒果分为三个等级,试验结果表明,选择投影面积和费雷特直径作为分级指标可以实现 97% 的识别准确率,选择周长或圆度也可实现芒果分级要求,但准确性较差。该方法通过适当调整可以应用于其他水果的形状检测。大连交通大学黄辰等<sup>[24]</sup>在研究基于图像特征融合的苹果在线分级方法时,采用凸度即目标像素个数与目标最小凸包像素个数的比值,结合傅里叶描述子补充轮廓信息进而描述苹果形状的规则程度,建立的分级模型分级准确率达 95%。石瑞瑶等<sup>[20]</sup>在苹果品质在线分级检测系统的设计中,把苹果横径与纵径的比值作为果形评判指标,数值越接近 1 说明果品形状越接近球形,从而量化苹果果形特征,试验结果表明系统分级准确率达 95%,说明横纵比可以用于提取果形特征。Peng 等<sup>[25]</sup>针对苹果、香蕉、柑橘、杨桃、梨和火龙果这六种水果对多类水果的识别进行了研究,利用形状不变矩等方法对果品的颜色和形状特征进行综合提

取。该设计首先采用 Otsu 阈值分割算法和 Canny 边缘检测算子完成果品的前景分割和边缘特性提取。在形状特征提取方法上,该设计采用计算图像中目标面积与目标外接圆面积之比提取果品的二维特征,同时通过提取目标轮廓的形状不变矩来描述果品的三维特征,最后采用 SVM 分类算法完成具体类别的识别。该系统对不同水果种类的识别率在 80%~95% 范围内,在水果识别分类的适应性上有较好的表现。以上研究表明,利用机器视觉检测果品形状可以通过提取果品二维特征来进行,结合傅里叶描述子或形状不变矩等传统算法,都可以在特定对象上取得不错的识别效果。

**1.2.5 颜色检测** 颜色是衡量水果外部品质的一个重要指标,高品质的水果一般具有着色好且均匀的特征。此外,果实颜色也间接反映了水果的成熟度和内部品质,若要从水果的外观判断其成熟度,一般需要与颜色检测结合起来,通过不同颜色空间的转换可以快速获取果实表面颜色信息。颜色空间是用一种数学方法形象化地表示颜色,目前在图像处理中广泛使用的颜色空间主要有 RGB 颜色空间、HSI 颜色空间和 Lab 颜色空间等:RGB 颜色空间采用物理三基色红(Red)、绿(Green)、蓝(Blue)表示,因其物理意义清晰,适合彩色显像管工作,但这一系统并不适应人的视觉特点;HSI 颜色空间采用色调(Hue)、色饱和度(Saturation)和亮度(Intensity)来描述颜色,通常把色调和饱和度通称为色度,用来表示颜色的类别与深浅程度。由于人的视觉对亮度的敏感程度远强于对颜色浓淡的敏感程度,为了便于颜色处理和识别,机器视觉技术为模仿人的视觉系统经常采用 HSI 颜色空间;Lab 颜色空间是基于人眼对颜色的感觉,用亮度(Light)和色差来描述颜色分量,同样可以用数字化方法描述人的视觉感官,而不受参考的设备模型干扰。

目前最常使用的颜色空间是最适应人类视觉特点的 HSI 颜色空间。李庆中团队<sup>[13]</sup>利用 HSI 颜色空间中的色度图像对苹果颜色进行检测与分级,团队通过观察和比对样本的色度直方图,将果实表面色度分为 7 个频度,并以此作为苹果颜色分级的特征参数。但只从色度图像来实现颜色检测难以避免外部环境光线的干扰,不利于颜色检测结果稳定输出。中国农业大学冯斌等<sup>[26]</sup>选用 HSI 颜色空间分析研究了不同色度的水果,结合各色度点的累计特性和空间分布特性,以各色度在水果表面分布的分形维数作为特征对果实进行分级,同时建立了卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)识别模型。实验结果表明,模型分级准确率达 95%。同时,分形维数在各等级间有明显的变化规律,可以作为着色分级特征对水果进行实时分类。江苏大学的赵杰文团队<sup>[27]</sup>同样选择 HSI 颜色空间进行红枣的颜色识别,设计系统提取色度的均值和均方差作为红枣的颜色特征

值,以此区别正常色度的红枣及个别整体或局部颜色偏暗的缺陷枣,使用 SVM 分类方法,识别准确率达 96.2%。浙江大学的饶秀勤等<sup>[28]</sup>研究了按脐橙表面颜色进行分级的方法,该研究通过 HSI 颜色空间,提出了基于 H 分量面积加权直方图的脐橙表面颜色特征提取方法,结合主成分分析(principal component analysis, PCA)方法,对水果表面曲率变化引起的检测误差进行补偿。试验结果表明,分级误差为 1.75%,取得不错的检测效果。意大利学者 Cavallo 等<sup>[29]</sup>在葡萄无损检测系统的研究中,通过提取场景中的 HSI 颜色特征信息,针对两个白葡萄品种分别进行了验证试验,交叉验证得到分类准确率分别达到 92% 和 100%。该系统大幅简化了硬件配置与处理过程中的人工干预程度,更利于应用于实际自动化生产中。但从另一个角度上来看,直接在 RGB 颜色空间内处理图像可以进一步简化算法,Arakeri 等<sup>[30]</sup>通过检测番茄的缺陷与成熟度设计了一款分级系统,系统使用 RGB 颜色空间,从番茄图像中提取 R、G、B 值通过实验选择的阈值进行成熟度判断,建立 CNN 预测模型,对成熟度的预测准确率达 96.47%。黄辰等<sup>[24]</sup>在基于图像特征融合的苹果分级方法研究中选用 RGB 分量值,包括 R 分量均值与方差、G 分量均值与方差、平均灰度等 5 个参数值来表征苹果颜色分布特征,也取得不错的识别效果。伊朗学者 Azarmdel 等<sup>[31]</sup>设计了一套桑葚成熟度分级专家系统,该系统从 R、B、 $b^*$ 和 Cr 四个参数中提取桑葚的颜色和纹理特征,以此作为人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型的输入,结合 SVM 算法可以实现 98.26% 的分级准确率。以上研究表明,HSI 颜色空间由于与人类视觉感官高度相似而被广泛应用于多项颜色检测研究中,选用 RGB 颜色空间则由于其适用于机器工作在一定程度上可以简化算法。因此,在对不同的检测对象进行检测试验时,出于检测目的的不同,可以考虑试用多种颜色空间对图像进行处理,必定能寻找到适用于特定检测对象的某种颜色空间。

**1.2.6 外观缺陷检测** 在水果外观缺陷检测方面,颜色的差异可以作为缺陷检测的一个特征方向。其中最简单的一个思路是通过灰度化图像进行,果实表面不同种类的缺陷其灰度值与邻近正常区域的灰度值有明显差异,可根据这一思路实现缺陷识别。Miller 和 Delwiche<sup>[32]</sup>采用彩色摄像机和近红外扫描摄像机获得桃子图像,提出了对桃子图像进行缺陷区域分割的图像分析算法,算法内容具体为对桃子表面的灰度图像进行阴影校正、边缘检测和图像分割,用二维高斯方程进行图像滤波完成边缘检测,然后用灰度和色度阈值及区域增长法求得损伤表面面积,最后通过分类器将分割的区域识别为特定的缺陷类型。试验表明在近红外区域获得的水果图像的缺陷检测效果比彩色图像的好,但会将果梗和花萼部分误判为

缺陷区域, 正确率仅为 69%, 与人工测得的结果相关系数为 0.56, 检测效果一般。Leemans 等<sup>[33]</sup>提出了一种基于颜色信息的苹果缺陷检测方法, 建立了基于果实表面色度变化的颜色模型。为了分割缺陷, 该系统将苹果图像每个像素的色度值与模型进行比较, 如果数值相匹配, 则认为它属于正常部分, 否则被视为缺陷。然后, 系统通过分别计算整个果面中每个像素的 RGB 三通道灰度值均值, 包括各种缺陷的三通道灰度值均值, 将其与正常部分的该值进行加权离差, 对以上的评判结果再做检验。最后系统借助局部色泽信息再次修正评判结果。试验结果表明该算法能够分割出各种缺陷。印度学者 Arlimatti<sup>[34]</sup>在他的研究中介绍了一种缺陷检测方法, 该方法将图像划分为多个窗口, 以窗口为单位提取苹果表面特征信息, 从而实现整体的缺陷提取。这是一种简单且高效的方法, 同时可以通过最近邻分类器(K-Nearest Neighbor, KNN)将缺陷部分与果实本身的茎端或花萼部分区分开来, 分类准确率达到 92%。结合光学特征可以提高系统缺陷检测的稳定性与准确率。刘禾等<sup>[35]</sup>利用光学反射特性, 在近红外波段拍摄到苹果图像, 提出了苹果正常区域与缺陷区域的阈值计算方法与图像窗口的快速确定方法, 这是一种实用的苹果表面缺陷图像检测方法。浙江大学的 Li 等<sup>[36]</sup>提出了一种橘子常见表面缺陷的检测方法, 方法通过基于 Butterworth 滤波器的照明变换方法结合计算图像中不同分量比率的茎端识别算法, 可以有效检测橘子表面缺陷区域, 检测准确率达到 98.9%。该方法对表面只有一种颜色的水果缺陷识别效果很好, 但对表面有多种颜色的水果识别效果较差。

通过与不同颜色空间相结合, 可以使检测系统更加便于应用于实际。Arakeri 等<sup>[30]</sup>在番茄分级系统中, 采用 RGB 颜色空间, 提取 R、G、B 通道的灰度平均值作为颜色统计特征, 再使用图像的灰度共生矩阵从每个颜色通道中提取四个纹理特征, 将这些特征作为 CNN 预测模型的输入, 由此系统实现对番茄的缺陷识别。试验结果表明, 系统对番茄表面缺陷的识别准确率达 100%。王干等<sup>[14]</sup>在脐橙采后田间分级系统中同样采用缺陷区域与背景灰度值存在明显差异的这一共性特征, 进行脐橙的缺陷检测。具体方法为对图像进行均值滤波处理后再与原图进行灰度值的比较, 若差异明显则将该点判定为缺陷区域。试验结果表明, 系统的缺陷数量识别率达 99%, 缺陷面积检测误差小于 7%, 可以实现实时的缺陷检测。李顺琴等<sup>[21]</sup>在橙子实时分级系统研究中通过分离出 HIS 颜色空间中的 S 分量图判断得到橙子表面因虫害导致的白色条纹及因病害和损伤造成的黑色烂点这两类缺陷, 系统采用 Otsu 阈值分割算法得到橙子表面缺陷的二值化图像并计算得到缺陷面积, 以此作为 RBF 神经网络模型的特征参数, 取得不错的分级效果。印度学者 Kumar 等<sup>[37]</sup>研究了番茄表面缺陷

的识别方法, 该方法采用小波变换算法识别并分割对象缺陷区域, 基于颜色与几何特征, 将缺陷准确识别为三种类型, 分别为黑点、烂点和黑素病点, 然后通过联级两个 SVM 分类器, 实现 98% 的识别准确率。而对于获取到的图像可能存在的果实球面面积畸变问题, Tao<sup>[10]</sup>提出了一种球形变换法, 该方法通过对曲面上的强度梯度进行补偿得到球面变换, 从而在不丢失物体缺陷的情况下生成平面物体图像, 再经过简单的阈值处理即可检测到缺陷区域。近年来, 国内外学者在水果缺陷检测的研究上取得了很大进展, 基于灰度化图像处理, 结合一些新兴的分类算法或滤波算法, 可以取得相对较好的检测效果, 使之在实际生产应用更加广泛。

### 1.3 优点及适用条件

计算机技术的快速发展加快了机器视觉技术的不断进步, 相关图像处理算法正不断被优化, 适用于实际生产的检测模型也在不断被完善。机器视觉技术具有快速、准确、无损, 能完成多项品质指标检测, 在水果外部品质检测上有着广泛的应用前景。但是其局限性也很明显, 该技术对于水果内部品质或轻微的外部损伤的检测能力较差, 单纯通过对外部品质的检测无法精准把控果品内部品质的各项指标。

## 2 光谱检测技术

### 2.1 近红外光谱检测

2.1.1 概述 红外线波段是人眼不可视波段, 近红外光谱检测技术是利用波长为 700~1100 nm 的电磁波来分析样品的结构和组成等信息, 从而实现样品的无损检测。该技术在水果品质检测中有许多优良的性能, 已知碳水化合物(糖、酸、水、维生素等)在近红外波段有不同的吸收峰, 基于这一理论基础可以建立许多相关模型服务于各项研究。近红外光谱分析技术是近年来发展最快、应用最广的水果内部品质无损检测方法, 可以精确检测水果内部的糖度、酸度、可溶性固形物含量、维生素含量等, 具有适应力强, 对人体无害, 操作简单等优点。

#### 2.1.2 应用方向

2.1.2.1 内部成分检测 近红外光谱检测技术可应用于水果糖度、酸度、pH 及可溶性固形物含量等内部品质成分的检测。印度学者 Jha 等<sup>[38]</sup>使用近红外光谱分析技术研究了多个品种苹果的甜度、酸度以及酸甜比模型, 该模型选用 900~1700 nm 的波长范围, 采用了偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLS) 和多元线性回归 (multiple linear regression, MLR) 两种统计学方法。试验结果表明使用 MLR 建立的模型预测准确率较高, 甜度、酸度以及酸甜比的预测模型多重相关系数分别为 0.887、0.890 和 0.893, 该模型基本可以实现不同品种苹果内部品质指标的无损检测。孙炳新等<sup>[39]</sup>将近红外光谱分析技术应用于检测苹果 pH 的研究中, 学者选用

波长范围为 643.26~985.11 nm 的近红外透射光谱仪对苹果样本进行光谱扫描,建立起红富士苹果有效酸度的预测模型。模型相关系数为 0.925,性能较稳定,可以对不同储藏期的苹果 pH 进行快速无损检测。王转卫等<sup>[40]</sup>建立了发育后期苹果内部品质及其近红外光谱特性之间的关系模型。试验方法具体为利用近红外漫反射技术测量发育后期三个月内富士苹果在 833~2500 nm 波长范围内的光谱特性,并通过测量得苹果样本的可溶性固形物含量、硬度、pH 以及含水量 4 种苹果内部理化指标,分析了单一波长下苹果的吸光强度与其各项内部品质指标之间的相关关系。试验结果表明,前后者之间的线性相关性均较弱,但通过极限学习机(extreme learning machine, ELM)算法结合 PCA 统计方法进行数据降维,试验最终可建立预测该品种苹果可溶性固形物含量和 pH 的最优模型,预测结果较为稳定。广东省农业科学院徐赛团队<sup>[41]</sup>采用可见光和近红外光谱技术(visible and near-infrared spectroscopy, VIS/NIR)对沙田柚中的水分和可溶性固形物进行快速无损检测,试验通过遗传算法(genetic algorithm, GA)进行特征提取,结合 PLSR 建立模型。该模型对验证集样本的检测准确率达 100%,成功将光谱技术应用于厚皮大果的品质无损检测上,试验结果表明通过 VIS/NIR 检测柚子的水分含量和可溶性固形物含量是充分可行的。以上研究结果表明,近红外光谱检测技术可用于水果内部成分检测,且在碳水化合物如糖、酸、水等成分的检测效果上有着显著优势。

**2.1.2.2 成熟度检测** 通过对水果内部单个品质指标的检测也可以引申到检测其成熟度。南非夸祖鲁-纳塔尔大学的 Olarewaju 团队<sup>[42]</sup>使用近红外光谱分析技术检测鳄梨果实成熟度,试验具体为建立偏最小二乘回归模型对果实的含油量、含水量和可溶性固形物含量等与成熟度相关的指标进行预测,研究结果显示在反射模式下的近红外系统对果实含油量和可溶性固形物含量的检测准确率较高,系统相对误差分别为 2.00 和 2.13,进一步表明这一方法对鳄梨成熟度指标参数的快速无损检测是充分可行的。Chen 等<sup>[43]</sup>通过使用 VIS/NIR 定量检测沙田柚 Lab 颜色空间中的各参数,以此实现沙田柚成熟度的检测。该方法将移动窗口偏最小二乘法(moving-window partial least square, MWPLS)和改进光程长度估计与校正法(modified optical path length estimation and correction, MOPLEC)相结合,达到优选波段同时充分优化其他建模参数的目的。试验结果表明,在所选的最佳波段范围内,模型的相关系数分别达到 0.913、0.997 和 0.940,均取得可观的预测效果。以上研究结果表明,近红外光谱检测技术是一种可靠的水果成熟度检测和表征方法。

**2.1.2.3 霉变检测** 同时,近红外光谱检测也可应用于果实的霉变检测上。李顺峰等<sup>[44]</sup>利用近红外漫反

射光谱技术判别苹果是否存在霉心病,试验方法具体为首先测量 4000~12000  $\text{cm}^{-1}$  波数范围内的正常苹果与霉心病苹果的光谱特性,结合切开果实判断其实际类别,通过 PCA 提取 20 个主特征,并将其输入 Fisher 判别分类方法建立得到苹果霉心病判别模型。该模型对训练集的正确判别率为 89.9%,对测试集的正确判别率为 87.8%。Tian 等<sup>[45]</sup>提出了一种基于水果尺寸大小的光谱自动校正方法,以改善 VIS/NIR 检测苹果发霉的效果。具体方法为通过建立苹果果肉中光的消光速率与苹果直径的对数线性模型,计算得到在果品内透射光的消光系数,并根据这一系数修改获取到的透射光谱。该学者基于校正后的光谱建立了误差反向传播人工神经网络(back propagation artificial neural network, BP-ANN)和 SVM 模型,模型在验证集中的准确率达 90.2%。以上研究促进了水果品质检测的准确性与稳定性。

## 2.2 拉曼光谱检测

**2.2.1 概述** 拉曼光谱技术是一门基于拉曼散射效应而发展起来的光谱分析技术,通过分子的振动或转动获得待测物的结构、对称性、电子环境等分子信息。目前拉曼光谱在水果检测中的应用大多与激光技术相结合,激光技术是利用由受激发射的光放大产生辐射产生的激光以完成质量检测。近年来随着激光技术的不断成熟,拉曼光谱技术已逐步应用于工农业生产与检测的多个领域,主要实现对待测物外部品质的检测。与常规化学分析技术相比,拉曼光谱技术具有无损、快速、环保、灵敏度高、无需制备试样、无需消耗化学试剂、所需样品量少等特点,可直接通过分析待测物的拉曼峰位、峰强、线型、线宽及谱线数目达到从分子水平对样品进行定性、定量和结构的分析<sup>[46-47]</sup>。在水果检测中,拉曼光谱主要应用于检测水果外表面轻微损伤、新鲜度、成熟度及表面农药残留等。

### 2.2.2 应用方向

**2.2.2.1 外表面擦伤检测** 采用拉曼光谱检测技术可以有效检测出果实表面早期的轻微损伤。高晓阳等<sup>[48]</sup>应用 LabVIEW 平台设计了一部基于拉曼光谱的苹果实时无损自动检测分类虚拟仪器分级系统样机,用于苹果表面擦伤无损检测。苹果的光谱特性采用一台 Nicolet 傅氏变换拉曼光谱仪进行采集,光谱数据通过典型变量分析法(canonical variable analysis, CVA)和主成分分析法(PCA)进行处理,再经不等中趋势分类模拟算法检验得到分类模型。试验结果表明,系统利用拉曼光谱分析技术对苹果擦伤的检测具有一定的可行性,可对苹果进行准确分级处理。高晓阳等<sup>[49]</sup>在次年的研究中,对该无损检测分级系统再做改进,使系统可以准确识别出无擦伤、轻擦伤及重擦伤三种类别的苹果,分级平均准确率分别为 100%、99% 和 97%,同时在系统运行速度上有了提升,达到每分钟可分级苹果 3~6 个。但总体来

说检测花费时间仍然较长,无法做到实时快速的无损检测。陈思雨等<sup>[50]</sup>则以富士苹果作为研究对象,应用拉曼光谱技术,结合化学计量方法对早期轻微损伤进行快速识别。光谱信息的预处理方法采用 Savitzky-Golay 卷积,在基线校正后使用非线性的 SVM 算法建立分类判别模型,模型分类准确率可达 97.8%。这些研究结果表明拉曼光谱技术是判别水果早期轻微损伤的一种有效手段。

**2.2.2.2 成熟度检测** 也有学者将拉曼光谱检测应用于果实成熟度及新鲜度的检测研究上。西班牙巴斯克大学 Trebolazabala 团队<sup>[51]</sup>分别采用便携式拉曼光谱仪和共焦显微拉曼光谱仪在不同激光波长下对不同成熟度的番茄内部主要识别成分进行定性检测。试验结果表明,未成熟番茄用于识别的主要成分为角质和表皮蜡,成熟番茄用于识别的主要成分为胡萝卜素、多酚和多糖。该研究证明拉曼光谱检测技术在番茄内部有机成分检测上是充分可行的。Trebolazabala 团队<sup>[52]</sup>在后续的研究中又采用便携式拉曼光谱仪对番茄在不同成熟阶段的内部营养物质成分含量的变化进行了跟踪和分析,该研究经过光谱信息分析,证明了在番茄逐渐成熟的过程中,类胡萝卜素含量增加,而叶绿素和表皮蜡含量减少。通过对比试验,结果表明采用便携式拉曼光谱仪获取的番茄内部品质信息与价格昂贵的共焦显微拉曼光谱仪无异,充分可以对番茄的成熟度进行分析检测。Nekvapil 等<sup>[53]</sup>使用便携式拉曼光谱仪对柑橘新鲜度进行了检测,该试验以类胡萝卜素的拉曼光谱信息作为新鲜度检测指标,提出拉曼新鲜度系数,这一系数随着柑橘放置时长呈线性衰减。通过试验证明了拉曼光谱技术适用于柑橘的新鲜度检测。

**2.2.2.3 农药残留检测** 拉曼光谱检测技术还经常被用于果实表面农药残留量的检测。Fan 等<sup>[54]</sup>将拉曼光谱技术应用于定量分析苹果中痕量的甲萘威农药残留量,实验方法具体为用主成分分析方法对样本表面增强拉曼光谱数据进行预处理,同时结合化学计量方法测定甲萘威的实际含量,使用 PLSR 和支持向量回归(support vector regression, SVR)分别建立光谱数据与样品甲萘威含量之间的相关模型。实验结果表明,两个模型均取得较稳定的预测效果,其中 SVR 模型表现最优,相关系数高达 0.986。这表明拉曼光谱检测技术是一种快速可靠的水果表面农药残留检测和表征方法。

## 2.3 高光谱成像技术

**2.3.1 概述** 高光谱图像是一系列光波在不同波长处的光学图像,高光谱成像技术是一种集图像信息与光谱信息于一体的无接触式检测技术,其中光谱信息可以反映样品内部结构的差异,图像信息则反映样品的形状、缺陷等外部品质特征,该技术能全面反映水果的内外品质信息。高光谱成像技术在对目标的空间特征成像的同时,对每个空间像元经过色散形成

数百个窄波段以进行连续的光谱覆盖,这样形成的数据可以用“图像立方体”或“三维数据块”来进行形象的描述。高光谱数据的二维图像中每个像素都包含一条光谱,可以用于传统机器视觉难以检测的早期腐烂、碰伤等外部损伤的检测,也可以用于内部品质如硬度、成熟度或各类营养成分含量的快速无损检测。

### 2.3.2 应用方向

**2.3.2.1 内部损伤检测** 对于水果内部损伤的检测,Pan 等<sup>[55]</sup>设计了一套用于冷藏过程中冻伤桃子的高光谱成像技术检测系统。为了在不降低检测效果的同时提升检测速率,该系统使用 ANN 模型筛选了八个具有典型光谱特征的特征波长,结合计量判断桃子是否被冻伤的理化质量指标,建立了果实质量参数与果实在特征波长下光谱响应之间的相关模型。以最佳代表性波长作为 ANN 模型的输入,系统对冻伤桃子分类准确率达 95.8%,研究结果表明使用高光谱图像技术检测果品冻伤是充分可行的。ElMasry 等<sup>[56]</sup>将高光谱成像技术和 ANN 模型应用于检测苹果的冻害,试验通过检测硬度指标来判断苹果是否冻伤。通过高光谱成像技术,系统获取到苹果光谱特性及图像并进行预处理,在使用全局阈值法确定最佳特征波长后,开发前馈反向传播人工神经网络(BP-ANN)模型以区分普通苹果和冻伤苹果,模型分类精度达 98.4%,可以稳定检测到由于冻害造成苹果硬度变化,该研究表明高光谱成像技术适用于水果硬度的检测。孙梅等<sup>[57]</sup>以苹果为研究对象,采用高光谱成像技术检测其风伤情况,用 PCA 对比分析不同光谱区域对识别结果的影响,结合权重系数,最终选取 714 nm 作为苹果风伤研究的最佳特征波长,建立的模型对苹果风伤检测准确率达 98%。比利时学者 Keresztes 等<sup>[58]</sup>设计了基于短波红外和高光谱成像技术的苹果损伤检测系统,系统采用偏最小二乘-判别分析(partial least squares - discriminant analysis, PLS-DA)模型,结合空间信息处理二进制图像后,对苹果损伤检测准确率达到 94.4%。上海交通大学 Wang 团队<sup>[59]</sup>研究了采用高光谱成像技术快速检测蓝莓内部的机械损伤的系统,系统将深度学习技术引入基于高光谱透射成像的软水果损伤检测研究中,通过建立 CNN 模型,结合 k 倍交叉验证的模型评估方法,取得 88% 的分类准确率,识别效果明显优于其他几种传统的机器学习算法。以上研究结果表明,高光谱成像技术可通过检测果实硬度变化从而对水果内部损伤如冻伤、风伤等进行检测,是一种快速可靠的水果内部损伤检测方法。

**2.3.2.2 内部成分检测** 对于内部成分的检测,高光谱成像技术也有一定应用价值。Rajkumar 等<sup>[60]</sup>通过使用高光谱成像技术采集可见光和近红外 400~1000 nm 的波长范围内香蕉样本的光谱信息与图像信息,结合化学计量方法确定果实水分、硬度及可溶性固形物的具体指标参数,使用 MLR 算法分别



建立了香蕉果实在三种不同温度条件下内部品质与其光谱特性之间的回归模型,该模型对香蕉果实水分、硬度及可溶性固形物的测定相关系数分别为0.91、0.85和0.87。中国农业大学的彭彦昆团队<sup>[61]</sup>利用高光谱成像技术建立了一种苹果内部品质无损检测方法,该方法具体为在524~1016 nm的波段范围内,采用洛伦兹函数拟合评估高光谱的空间散射曲线并提取相关参数,使用PLS建立苹果硬度与其光谱特性的预测模型。研究表明,模型相关系数达0.88,基本可以实现苹果硬度的快速无损检测。Dong等<sup>[62]</sup>采用高光谱成像技术在近红外区域(900~1700 nm)检测储存13周的苹果内部品质,包括可溶性固形物含量(soluble solid content, SSC)、硬度、水分(moisture content, MC)以及pH。该模型选用连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)和无信息变量消除算法(uninformative variable elimination, UVE)两种典型的变量选择方法从苹果的全光谱中提取特征变量,结合化学计量手段,使用PLS,最小二乘支持向量机(least squares support vector machines, LSSVM)和反向传播网络(back propagation, BP)三种建模方法共建立多个关于苹果SSC、硬度、MC和pH的预测模型。试验结果表明,所有模型都可以准确预测苹果的SSC和MC,但都无法预测硬度,其中SPA-LSSVM和FS-BP模型可以粗略预测pH。试验结果证明近红外高光谱反射成像技术在苹果SSC、MC和pH的检测上有一定可行性。以上研究结果表明,高光谱成像技术可以同时获取样本的光谱信息和图像信息,可对水果外部品质及内部品质作出综合评价,应用范围较广。

#### 2.4 优点及适用条件

光谱技术是果品内部质量检测中应用最广泛的高新技术,利用物体不同光学特性所对应的特征光谱研究物质结构或测定化学成分,可以实现对果品内部品质(硬度、脆度、酸甜度)以及内部病变等情况的无损检测。传统的水果内部品质检测方法是通过对理化实验分析,虽然结果精确,但操作过程繁琐、效率较低、检测成本较高且会对果品造成损伤,相比之下用光谱技术检测水果品质具有操作简便、精确度较高、非破坏性的特点。由于水果的内部结构各不相同,在不同波长的光线照射下会有不同的吸收、反射或者透射特性,具体表现在水果的光谱反射率或吸收率在某一段或几段特定波长内出现峰值,可由此建立起该特征峰值与水果本身质量指标的数据模型,进而实现果品质量的检测。在实际检测应用中,光谱检测技术可以同时检测果品的外部 and 内部品质,定性分析的准确性较高,但需要较为复杂的建模过程,检测速度慢、定量分析的精度还有待提高也是其明显的缺陷。具体到每种技术上,近红外光谱检测技术是分析化学领域发展迅速的检测技术之一,具有快速、无损和可实现多组分同时测定的特点。拉曼光谱分析技

术多适用于水果的外部损伤和农药残留检测,但前期需要进行大量数据检测及数据分析过程,较难实现在线检测。高光谱成像技术采集的数据精度高,适合实验阶段。但与拉曼光谱分析技术有同样的缺点:数据量过大,处理时间长,不适合在线检测。

### 3 结语与展望

除了以上详细介绍的四种光学无损检测技术外,还有很多无损检测技术正在水果检测中被广泛应用:基于气体传感器技术的电子鼻能够通过获取水果的气味信息对气体或挥发性成分做定性或定量的检测,正被研究应用于水果的成熟度和新鲜度检测;利用水果介电特性的介电特性检测技术对果品的检测适应性较强,可对水果新鲜度、机械损伤、糖度和硬度等进行检测识别;利用X射线对待测物内部透射成像的X射线成像技术对水果的内部结构变化敏感,能直观反映水果密度、含水率及内部缺陷等品质特征;通过计算组织中氢质子数量信息的核磁共振技术在水果内部品质,特别是成熟度和内部缺陷上也有一定应用<sup>[63-65]</sup>。

各种无损检测技术都有其各自的适用范围与优点,正确认识不同无损检测技术的特点与局限性对水果的检测与生产具有重要意义。对于机器视觉而言,该技术对果实内部品质特征的检测存在一定局限性,则可以在外部检测中充分发挥其快捷客观的优势,将其应用于大批量或高质量要求的生产实践中,为水果产业解放生产力、加快分拣效率提供保障。而对于光谱检测技术,未来可根据具体的检测对象要求,寻找最佳的检测波长等参数,减少数据量,设计对应的光谱图像系统,在不降低精度的前提下,降低成本和节约时间。

综合来看,各种检测技术功能不同,但单一的检测技术已经无法满足对水果品质的全面检测,采用多源信息融合的方式可以全方面多角度地获取水果品质相关特征信息,对无损检测的精度及稳定性会有很大提升。现有的无损检测多源信息融合大多聚焦于水果大小、形状、颜色等外部特征,对水果内部品质检测技术的融合应用仍然较少,多源信息融合是水果品质无损检测技术发展的必然趋势。但与此同时,多源信息融合必定会造成数据量过大,在数据的传输与处理上会花费更多的时间,这需要研究人员再做深入的试验研究,大致可以从完善模型算法、优化硬件结构与数据降维这几个方面进行考虑。

#### 参考文献

- [1] 谭俊杰,杨尚东,周柳强,等.基于中国—东盟水果贸易的广西优质柑橘产业发展策略探析[J].南方农业学报,2020,51(2):470-476. [TAN Junjie, YANG Shangdong, ZHOU Liuqiang, et al. High-quality citrus industry development strategies of Guangxi based on China-ASEAN fruit trade[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(2): 470-476.]
- [2] 翁鸣.中国农产品进出口现状及其特点[J].国际贸易,

- 2013(6):30-35. [WENG Ming. Current situation and characteristics of import and export of agricultural products in China[J]. Intertrade, 2013(6): 30-35.]
- [3] 巴勒江·马迪尼也提, 布娲鞑·阿布拉. 中国水果出口贸易的比较优势及影响因素分析[J]. 世界农业, 2019(7): 57-68. [BALJAN Madeniet, BUJAN Abela. Analysis of comparative advantages and related factors of Chinese fruit export trade[J]. World Agriculture, 2019(7): 57-68.]
- [4] 刘妍, 周新奇, 俞晓峰, 等. 无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 27-37. [LIU Yan, ZHOU Xinqi, YU Xiaofeng, et al. Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 27-37.]
- [5] 陈兵旗, 吴召恒, 李红业, 等. 机器视觉技术的农业应用研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(11): 54-65. [CHEN Bingqi, WU Zhaoheng, LI Hongye, et al. Research of machine vision technology in agricultural application: Today and the future[J]. Science and Technology Review, 2018, 36(11): 54-65.]
- [6] 高迎旺, 耿金凤, 饶秀勤. 果蔬采后内部损伤无损检测研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 277-287. [GAO Yingwang, GENG Jinfeng, RAO Xiuqin. Non-invasive bruise detection in postharvest fruits and vegetables: A review[J]. Food Science, 2017, 38(15): 277-287.]
- [7] 柳琦, 涂郑禹, 陈超, 等. 计算机视觉技术在食品品质检测中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 208-213. [LIU Qi, TU Zhengyu, CHEN Chao, et al. Application of computer vision technology in the food quality inspection[J]. Food Research and Development, 2020, 41(16): 208-213.]
- [8] 白菲, 孟超英. 水果自动分级技术的现状与发展[J]. 食品科学, 2005(S1): 145-148. [BAI Fei, MENG Chaoying. Research progress and commercialization of the automatic classification technology[J]. Food Science, 2005(S1): 145-148.]
- [9] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1640-1663. [TANG Bo, KONG Jianyi, WU Shiqian. Review of surface defect detection based on machine vision[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(12): 1640-1663.]
- [10] YANG Tao. Spherical transform of fruit images for on-line defect extraction of mass objects[J]. Optical Engineering, 1996, 35(2): 344-350.
- [11] NAKANO K. Application of neural networks to the color grading of apples[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1997, 18(2-3): 105-116.
- [12] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 395-405.
- [13] 李庆中, 张漫, 汪懋华. 基于遗传神经网络的苹果颜色实时分级方法[J]. 中国图象图形学报, 2000(9): 71-76. [LI Qingzhong, ZHANG Man, WANG Maohua. Real-time apple color grading based on genetic neural network[J]. Journal of Image and Graphics, 2000(9): 71-76.]
- [14] 王干, 孙力, 李雪梅, 等. 基于机器视觉的脐橙采后田间分级系统设计[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 672-676. [WANG Gan, SUN Li, LI Xuemei, et al. Design of postharvest in-field grading system for navel orange based on machine vision[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2017, 38(6): 672-676.]
- [15] AKIRA Mizushima, LU Renfu. An image segmentation method for apple sorting and grading using support vector machine and Otsu's method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 94: 29-37.
- [16] ZHANG Baohua, HUANG Wenqian, GONG Liang, et al. Computer vision detection of defective apples using automatic lightness correction and weighted RVM classifier[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 143-151.
- [17] MEHRDAD Baigvand, AHMAD Banakar, SAEED Minaei, et al. Machine vision system for grading of dried figs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 119: 158-165.
- [18] 籍保平, 吴文才. 计算机视觉苹果分级系统[J]. 农业机械学报, 2000(6): 118-121. [JI Baoping, WU Wencai. Apple grading system with machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000(6): 118-121.]
- [19] 陈艳军, 张俊雄, 李伟, 等. 基于机器视觉的苹果最大横切面直径分级方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 284-288. [CHEN Yanjun, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Grading method of apple by maximum cross-sectional diameter based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 284-288.]
- [20] 石瑞瑶, 田有文, 赖兴涛, 等. 基于机器视觉的苹果品质在线分级检测[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(3): 80-86. [SHI Ruiyao, TIAN Youwen, LAI Xingtiao. Development of apple intelligent on-line inspection and classification system based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(3): 80-86.]
- [21] 李顺琴, 陈勇, 何娇. 基于计算机视觉的橙子分级研究设计[J]. 农机化研究, 2018(9): 218-222. [LI Shunqin, CHEN Yong, HE Jiao. Design of oranges based on computer vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018(9): 218-222.]
- [22] 李顺, 胡家坤. 基于机器视觉的苹果在线分级[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 123-128, 153. [LI Qi, HU Jiakun. Research on apple online classification based on machine vision[J]. Food and Machinery, 2020, 36(8): 123-128, 153.]
- [23] MOMIN M A, RAHMAN M T, SULTANA M S, et al. Geometry-based mass grading of mango fruits using image processing[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 150-160.
- [24] 黄辰, 费继友. 基于图像特征融合的苹果在线分级方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 285-291. [HUANG Chen, FEI Jiyou. Online apple grading based on decision fusion of image features[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 285-291.]
- [25] PENG Hongxing, SHAO Yuanyuan, CHEN Keying, et al. Research on multi-class fruits recognition based on machine vision and SVM-Science Direct[J]. IFAC-Papers on Line, 2018, 51(17): 817-821.

- [26] 冯斌,汪懋华.基于颜色分形的水果计算机视觉分级技术[J].农业工程学报,2002(2):141-144. [FENG Bin, WANG Maohua. Computer vision classification of fruit based on fractal color[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002(2): 141-144.]
- [27] 赵杰文,刘少鹏,邹小波,等.基于支持向量机的缺陷红枣机器视觉识别[J].农业机械学报,2008(3):113-115,147. [ZHAO Jiewen, LIU Shaopeng, ZOU Xiaobo, et al. Recognition of defect chinese dates by machine vision and support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008(3): 113-115,147.]
- [28] 饶秀勤,应义斌.水果按表面颜色分级的方法[J].浙江大学学报(工学版),2009,43(5):869-871. [RAO Xiuqin, YING Yibin. Grading a fruit by it's surface color[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 43(5): 869-871.]
- [29] DARIO Pietro Cavallo, MARIA Cefola, BERNARDO Pace, et al. Non-destructive and contactless quality evaluation of table grapes by a computer vision system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 558-564.
- [30] MEGHA P Arakeri, Lakshmana. Computer vision based fruit grading system for quality evaluation of tomato in agriculture industry[J]. Procedia Computer Science, 2016, 79: 426-433.
- [31] HOSSEIN Azarmdel, AHMAD Jahanbakhshi, SEYED Saied Mohtasebi, et al. Evaluation of image processing technique as an expert system in mulberry fruit grading based on ripeness level using artificial neural networks (ANNs) and support vector machine (SVM)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 166: 111-201.
- [32] MILLER B K, DELWICHEM J. Peach defect detection with machine vision[J]. Transaction of the ASAE, 1991, 34(6): 2588-2597.
- [33] LEEMANS V, MAGEIN H, DESTAIN M F. Defects segmentation on 'Golden Delicious' apples by using colour machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998, 20(2): 117-130.
- [34] Arlimatti S R. Window based method for automatic classification of apple fruit[J]. Eng Res Appl, 2012, 2(4): 1010-1013.
- [35] 刘禾,汪懋华.基于数字图像处理的苹果表面缺陷分类方法[J].农业工程学报,2004(6):138-140. [LIU He, WANG Maohua. Method for classification of apple surface defect based on digital image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004(6): 138-140.]
- [36] LI Jiangbo, RAO Xiuqin, WANG Fujie, et al. Automatic detection of common surface defects on oranges using combined lighting transform and image ratio methods[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 82(Complete): 59-69.
- [37] KUMAR Dhakshina S, ESAKKIRAJAN S, BAMA S, et al. A microcontroller based machine vision approach for tomato grading and sorting using SVM classifier[J]. Microprocessors and Microsystems, 2020, 76: 90-103.
- [38] JHA S N, GARG Ruchi. Non-destructive prediction of quality of intact apple using near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(2): 207-213.
- [39] 孙炳新,匡立学,徐方旭,等.苹果有效酸度的近红外无损检测研究[J].食品工业科技,2013,34(15):298-301. [SUN Bingxin, KUANG Lixue, XU Fangxu, et al. Nondestructive measurement of pH in apples using near infrared spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 298-301.]
- [40] 王转卫,迟嵩,郭文川,等.基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测[J].农业机械学报,2018,49(5):348-354. [WANG Zhuanwei, CHI Qian, GUO Wenchuan, et al. Internal quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 348-354.]
- [41] XU Sai, LU Huazhong, CHRISTOPHER Ference, et al. Rapid nondestructive detection of water content and granulation in postharvest "Shatian" pomelo using visible/near-infrared spectroscopy[J]. Biosensors, 2020, 10(4): 41.
- [42] OLAOLUWA Omoniyi Olarewaju, ISA Bertling, LEMBE Samukelo Magwaza. Non-destructive evaluation of avocado fruit maturity using near infrared spectroscopy and PLS regression models[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 199: 229-236.
- [43] CHEN Huazhou, XU Lili, TANG Guoqiang, et al. Rapid detection of surface color of Shatian pomelo using Vis-NIR spectrometry for the identification of maturity[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 192-201.
- [44] 李顺峰,张丽华,刘兴华,等.基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别[J].农业机械学报,2011,42(10):158-161. [LI Shunfeng, ZHANG Lihua, LIU Xinghua, et al. Discriminant analysis of apple moldy core using near infrared diffuse reflectance spectroscopy based on principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 158-161.]
- [45] TIAN Shijie, ZHANG Junhua, ZHANG Zhongxiong, et al. Effective modification through transmission Vis/NIR spectra affected by fruit size to improve the prediction of moldy apple core[J]. Infrared Physics and Technology, 2019, 100: 117-124.
- [46] 刘燕德,靳昱昱.拉曼光谱技术在农产品质量安全检测中的应用[J].光谱学与光谱分析,2015,35(9):2567-2572. [LIU Yande, JIN Tantan. Application of raman spectroscopy technique to agricultural products quality and safety determination[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(9): 2567-2572.]
- [47] RASOUL Malekfar, NASIM Mohammadian, SARA Abbasian, et al. A back-scattering laser Raman combination method of EFIRS and SERS to study TiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 488(1): 325-327.
- [48] 高晓阳,PAUL Heinemann,JOSEPH Irudayaraj.苹果擦伤拉曼光谱无损检测虚拟系统研究[J].农业工程学报,2005(3):130-133. [GAO Xiaoyang, PAUL Heinemann, JOSEPH Irudayaraj. Non-destructive apple bruise detection with Raman spectroscopy and its virtual instrumentation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(3): 130-133.]
- [49] 高晓阳,PAUL Heinemann,JOSEPH Irudayaraj.基于LabVIEW的苹果擦伤分级系统设计[J].农业机械学报,

- 2006(4): 152–154. [GAO Xiaoyang, PAUL Heinemann, JOSEPH Irudayaraj. Design of apple scratch grading system based on LabVIEW[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006(4): 152–154.]
- [50] 陈思雨, 张舒慧, 张纤, 等. 基于共聚焦拉曼光谱技术的苹果轻微损伤早期判别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 430–435. [CHEN Siyu, ZHANG Shuhui, ZHANG Shu, et al. Detection of early tiny bruises in apples using confocal Raman spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(2): 430–435.]
- [51] JOSU Trebolazabala, MAITE Maguregui, HÉCTOR Morillas, et al. Use of portable devices and confocal Raman spectrometers at different wavelength to obtain the spectral information of the main organic components in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits[J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2013, 105: 391–399.
- [52] JOSU Trebolazabala, MAITE Maguregui, HÉCTOR Morillas, et al. Portable Raman spectroscopy for an in-situ monitoring the ripening of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 180: 138–143.
- [53] FRAN Nékvapil, IOANA Brezestean, DANIEL Barchewitz, et al. Citrus fruits freshness assessment using Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 560–567.
- [54] FAN Yuxia, LAI Keqiang, BARBARA A Rasco, et al. Determination of carbaryl pesticide in Fuji apples using surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with multivariate analysis[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(1): 352–357.
- [55] PAN Leiqing, ZHANG Qiang, ZHANG Wei, et al. Detection of cold injury in peaches by hyperspectral reflectance imaging and artificial neural network[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 134.
- [56] GAMAL ElMasry, WANG Ning, CLÉMENT Vigneault. Detecting chilling injury in red delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 52(1): 1–8.
- [57] 孙梅, 陈兴海, 张恒, 等. 高光谱成像技术的苹果品质无损检测[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1272–1277. [SUN Mei, CHEN Xinghai, ZHANG Heng, et al. Nondestructive inspect of apple quality with hyperspectral imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1272–1277.]
- [58] JANOS C Keresztes, ELIEN Diels, MOHAMMAD Goodarzi, et al. Glare based apple sorting and iterative algorithm for bruise region detection using shortwave infrared hyperspectral imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 130: 103–115.
- [59] WANG Zhaodi, HU Menghan, ZHAI Guangtao. Application of deep learning architectures for accurate and rapid detection of internal mechanical damage of blueberry using hyperspectral transmittance data[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1126.
- [60] RAJKUMAR P, WANG N, EIMASRY G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194–200.
- [61] 彭彦昆, 李永玉, 赵娟, 等. 基于高光谱技术苹果硬度快速无损检测方法的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(6): 667–671. [PENG Yankun, LI Yongyu, ZHAO Juan, et al. Establishment of rapid and non-destructive detection method of apple firmness using hyperspectral images[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2012, 3(6): 667–671.]
- [62] DONG Jinlei, GUO Wenchuan. Nondestructive determination of apple internal qualities using near-infrared hyperspectral reflectance imaging[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(10): 2635–2646.
- [63] 王顺, 黄星奕, 吕日琴, 等. 水果品质无损检测方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 319–324. [WANG Shun, HUANG Xingyi, LIU Riqin, et al. Research progress of nondestructive detection methods in fruit quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 319–324.]
- [64] 徐赛, 陆华忠, 丘广俊, 等. 水果品质无损检测研究进展及应用现状[J]. 广东农业科学, 2020, 47(12): 229–236. [XU Sai, LU Huazhong, QIU Guangjun, et al. Research progress and application status of fruit quality nondestructive detection technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(12): 229–236.]
- [65] 窦文卿, 柴春祥, 鲁晓翔. 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 354–359. [DOU Wenqing, CHAI Chunxiang, LU Xiaoxiang. Research progress of non-destructive detection technique in fruit quality evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 354–359.]