

## 图像处理与识别在果蔬成熟度监测中的研究及应用

黎施欣, 范小平\*

(华南农业大学 食品学院, 广州 510642)

**摘要:** **目的** 分析了果蔬成熟度自动监测对发展智慧农业的重要意义, 对图像处理与识别技术在监测果蔬成熟度领域的研究与应用现状进行综述、总结与展望, 以期为我国发展果蔬成熟度在线或自动检测识别技术提供参考。**方法** 对图像处理与识别在监测果蔬成熟度中的原理、优势进行分析, 对特征提取、深度学习中的神经网络在该领域中的应用研究进展进行综述。**结果** 采用以图像处理和识别为核心的计算机视觉检测技术对果蔬的颜色、纹理等外部特征进行成熟度检测具有优势, 结合神经网络对果蔬成熟度进行检测的识别率高, 可在采摘、运输等场景对果蔬成熟度进行监测。**结论** 图像处理与识别技术在果蔬成熟度监测领域有望得到突破, 将催生更多新的应用场景。

**关键词:** 果蔬成熟度; 图像处理; 图像识别; 计算机视觉检测技术; 神经网络

**中图分类号:** TB487 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0153-12

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.018

## Research and Application of Image Processing and Recognition in Maturity Monitoring of Fruit and Vegetable

LI Shixin, FAN Xiaoping\*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze the importance of automatic monitoring of fruit and vegetable maturity to the development of smart agriculture, and to review, summarize and prospect the research and application status of image processing and recognition technology in the field of fruit and vegetable maturity monitoring, in order to provide a reference for the development of online or automatic detection and identification technology of fruit and vegetable maturity in China. The principles and advantages of image processing and recognition in monitoring the maturity of fruit and vegetable were analyzed, and the research progress of neural networks in feature extraction and deep learning in this field was reviewed. The computer vision detection technology with image processing and recognition as the core had advantages in detecting the maturity of external features such as color and texture of fruit and vegetable, and the recognition rate of fruit and vegetable maturity detection by combining neural networks was high, which could promote the monitoring of fruit and vegetable maturity in picking, transportation and other scenarios. Image processing and recognition technology are expected to make further breakthroughs in the field of fruit and vegetable maturity monitoring, which will promote more and new application scenarios.

**KEY WORDS:** fruit and vegetable maturity; image processing; image recognition; computer vision detection technology; neural networks

收稿日期: 2023-07-21

基金项目: 广东省科技专项资金 (210714116891352); 广东省科技创新战略专项资金 (pdjh2021b0087)

\*通信作者

果蔬营养丰富,可为人体提供维生素、矿物质等维持机体生长发育和生存的营养素,具有良好的抗氧化、抗炎等功效<sup>[1]</sup>。鉴于果蔬对人体的重要性,果蔬产业得到了社会的广泛关注。在农业产业结构发展中,果蔬产业的地位不断提高。在第四次产业革命浪潮的推动下,世界农业产生了一种基于智慧农业和创新农业的生产方式,使农业生产朝着自动化和智能化的方向发展<sup>[2]</sup>。目前,计算机技术为智慧农业的发展提供了强大的技术支持,促进了智慧农业的发展,智慧农业已经成为促进我国现代农村经济发展的主要形式<sup>[3-4]</sup>。

基于智慧农业的背景,从果蔬的种植、采摘、运输到销售,均与计算机视觉技术有着密切联系。计算机视觉技术作为质量评估、分类、分级和智能机器人采摘的一种重要技术,已有不少学者进行了大量相关研究,且在实际应用中已取得良好效果<sup>[4-8]</sup>。以图像处理与识别为基础,计算机视觉技术主要应用于果蔬质量分级、果蔬自动采摘和果蔬表面缺陷检测等方面,在智能化商品交易、智能冰箱、果蔬采摘机器人等方面也有着广泛应用<sup>[9-12]</sup>。特别是在农业采摘过程中,通过拍摄图像信息,并对果蔬图像进行识别、处理、分析,判断果蔬的成熟度,进而判断是否对其进行采摘,可以显著提高果蔬的生产效率<sup>[13]</sup>。为了实现果蔬产品从初级原料到高附加值商品的转化,在果蔬采收、包装、存储、运输及后加工过程中,根据果蔬的成熟度来筛选和区分,有利于保护和改善果蔬品质,增加经济效益<sup>[14-16]</sup>。文中综述了果蔬成熟度的图像处理与识别技术的研究与应用进展,重点阐述了图像处理中对果蔬外部特征的提取,以及图像识别过程与深度学习神经网络的结合应用,并指出关于图像处理和识别技术在检测果蔬成熟度方面所面临的挑战,为进一步拓展计算机视觉技术中的图像处理与识别技术在果蔬中的应用提供参考。

## 1 果蔬成熟度的分级与检测

### 1.1 果蔬成熟度的分级

采收成熟度是影响果蔬品质和货架期的重要因素之一,根据果蔬成熟的特性,将果蔬成熟期划分为可采成熟期、食用成熟期、生理成熟期。处于可采成熟期的果蔬基本完成了物质的积累,但食用口感较差,适用于贮藏、加工或长途运输等。在食用成熟期,果蔬的营养价值达到最高,品质最好,适用于就地销售、短期贮藏和运输。在生理成熟期,果蔬在生理上已经充分成熟,品质变差,营养价值下降,不宜食用,也不再适合于运输贮藏<sup>[17-19]</sup>。

目前,确定成熟期的标准有采收时间、外观颜色、硬度、果实生育期等,大多数果蔬的成熟度(水果、瓜类、茄果类蔬菜)主要依靠颜色来判定<sup>[20-21]</sup>。例如,根据美国农业部制定的番茄成熟期颜色标准,将番茄的成熟度等级分为“Green”(果皮完全绿色)、“Breaker”(果皮红色少于10%)、“Turning”(果皮红色超过10%但少于30%)、“Pink”(果皮红色超过30%但少于60%)、“Light-red”(果皮红色超过60%但少于90%)、“Red”(果皮红色超过90%)<sup>[22]</sup>;采摘后的蟠枣果实需要根据果实的外观颜色来进行成熟度的分级(初红、半红、全红)<sup>[23]</sup>。

### 1.2 果蔬成熟度的无损检测技术

传统的检测技术主要依靠人工通过果蔬的外观品质来进行成熟度的判断识别,受到主观因素、仪器设备的影响大、效率低、误判率高。随着科技的发展,现有的果蔬成熟度检测技术分为无损检测技术和有损检测技术。有损检测技术主要采用理化检测分析方法,并基于果蔬的可溶性糖含量和硬度等理化指标来判断其成熟度,这种方法破坏了果蔬的组织,且检测周期长、时效性差<sup>[24]</sup>。无损检测技术主要利用声、光、力、电、磁等特性,在不损伤果蔬和不影响果蔬特性的前提下,对其外部和内部品质信息进行获取和分析评价<sup>[25]</sup>。与有损检测技术相比,无损检测技术不会损害被检测果蔬的使用性,可对被检测的果蔬进行更高精度和更全面的检测<sup>[26]</sup>。无损检测技术主要有电学特性分析法、电子鼻技术、计算机视觉检测技术、近红外光谱技术、高光谱成像技术等<sup>[24, 26-38]</sup>,具体见表1。

利用果蔬的电学特性来评定成熟度的无损检测方法在技术和原理上具有仪器简单、便携、信号处理容易等优点。李子文等<sup>[35]</sup>利用长枣的电学参数,高效判定了长枣的成熟度。然而,电学特性分析法在果蔬的成熟度自动化判别及判别模型精度上存在较大不足<sup>[30]</sup>。采用电子鼻技术检测果蔬成熟度,具有快速、简单、重现性好、成本低等优点。Tyagi等<sup>[36]</sup>利用电子鼻技术对水果进行成熟度检测的准确率高,但其核心部件传感器易受到环境因素的影响,且不易便携<sup>[31]</sup>。近红外光谱技术具有成本低、效率高,以及能测定多种组分等优点,广泛应用于果蔬成熟度的检测。吴德刚等<sup>[37]</sup>提出了基于近红外光谱的大枣成熟度无损检测方法,能够快速、高精度地对大枣成熟度进行检测,但该技术通常不能对果蔬中较低含量成分进行检测<sup>[32]</sup>。此外,高光谱成像技术具有检测效率高,可同时检测多个果蔬样品等优点。Yang等<sup>[38]</sup>将高光谱成像技术用于不同蓝莓成熟阶段的分类,结果表明,该技术分类条带精度高,但信息冗余度过高、设备昂贵<sup>[33]</sup>,不利于大规模在线检测。

表 1 果蔬成熟度的无损检测技术  
Tab.1 Non-destructive detection technology for fruit and vegetable maturity

方法	简介/原理	优点	缺点	参考文献
电学特性分析法	利用电学参数反映果蔬不同生长阶段的内部变化,分析介电参数变化趋势,并与其内部理化指标建立相关性来测定果蔬成熟度	设备简单,信号易处理,快速便捷,数据量少	易受到外界环境的影响,检测精度偏低	[28-29]
电子鼻技术	通过模拟人和动物的鼻子感知果蔬成熟时所散发出的特定物质	操作简单,成本低,反应快,重现性好	易受到环境温湿度、气压的影响,检测结果受到传感器灵敏度及模型算法的制约	[30-31]
近红外光谱技术	通过定量分析果蔬成熟时物质在某些光谱区的吸收强度和吸光粒子数的关系来分析成熟度	成本低,分析效率高,可检测内部成分,可实现多组分同时检测和在线检测	不适用于水分含量高于80%的果蔬,建模难度大	[32-33]
高光谱成像技术	获取果蔬相应品质指标的光谱特征,建立各指标含量的预测模型,再结合图像分析,可对果蔬品质进行准确快速的评价	检测效率高,操作简单,可同时对多个样品进行定性和定量分析	信息冗余度过高,成本高,模型普适性较差	[34-35]
计算机视觉检测技术	利用图像采集装置和计算机技术演化人类的视觉功能,对果蔬图像进行特征提取,通过对目标区域进行处理和分析来判定成熟度	非接触,速度快,检测稳定,精度高,可实现长时间的实时监测与控制	受到图像质量的影响大,对环境光照条件要求较高,无法检测到水果内部成分的变化	[36-38]

相较于其他无损检测技术,计算机视觉检测技术不仅具有检测快速、稳定、精度高等优点,且在颜色、纹理等外部特征变化明显的果蔬成熟度快速及自动化检测上具有优势<sup>[34]</sup>,因此该技术广泛应用于草莓、番茄、香蕉等果蔬的成熟度检测识别。由于果蔬的成熟度与其表面颜色特征、纹理特征密切相关,所以计算机视觉技术可以在不破坏果蔬组织的情况下捕捉深层次的纹理和颜色特征来检测果蔬的成熟度,弥补传统无损检测技术的不足,为成熟果蔬的自动化和智能化采摘提供技术支持<sup>[29]</sup>。

与其他无损检测技术相比,计算机视觉检测技术也存在局限性,该技术只能捕捉果蔬的外观信息,而无法得到果蔬成熟时的内部信息,研究人员在获得果蔬图像判定结果后,还需要根据果蔬的品质和生理特性,才能确定适宜的果蔬采收成熟度<sup>[39]</sup>。在此情况下,有部分学者采用多种检测技术对果蔬成熟度进行研究。例如,基于高光谱和多光谱的果蔬识别是一种行之有效的办法。Steinbrener 等<sup>[40]</sup>使用 RGB 图像数据预先训练的卷积神经网络对高光谱图像进行分类,并利用高光谱图像提供的附加信息来提高果蔬识别准确性。薛建新等<sup>[41]</sup>对沙金红杏不同成熟阶段的可溶性固形物含量进行测定和分析,并基于高光谱成像技术对光谱信息、图像纹理信息、图像颜色信息进行数据融合,以检测沙金红杏的成熟度。研究表明,可溶性固形物与成熟度存在相关性,且可根据该指标来

划分成熟度,并得出通过融合光谱特征波长和图像颜色信息来判别果蔬成熟度的效果最好的结论。高光谱图像可以反映成熟度变化的内部性质,如何在深度学习中融合高光谱图像,使果蔬成熟度的应用具有更强的鲁棒性,逐渐成为当前果蔬品质检测及分级分类的研究热点之一<sup>[42]</sup>。

## 2 图像处理与识别技术监测果蔬成熟度的原理

### 2.1 计算机视觉系统的组成

图像处理与识别技术是计算机视觉系统的核心内容,系统结构如图 1 所示。首先,采用 CCD 照相机对图像进行采集,然后,通过图像处理模块、智能判断决策模块等进行精确的运算和分析,包括主成分分析方法、线性回归、贝叶斯决策、支持向量机、人工神经网络等算法,其构建的判别模型为图像目标的判断提供了依据<sup>[43]</sup>。系统的硬件部分主要有光源设备、相机、镜头、图像处理卡及辅助执行机构等<sup>[44]</sup>。

### 2.2 果蔬成熟度的图像处理原理

基于计算机视觉算法的图像处理技术利用传感器将图像信号转换为数字信号,再通过计算机来加工处理和重新合成信号,最后获得预期的图像效果<sup>[45]</sup>。针对果蔬的图像处理技术的一般过程主要包括图像采集、

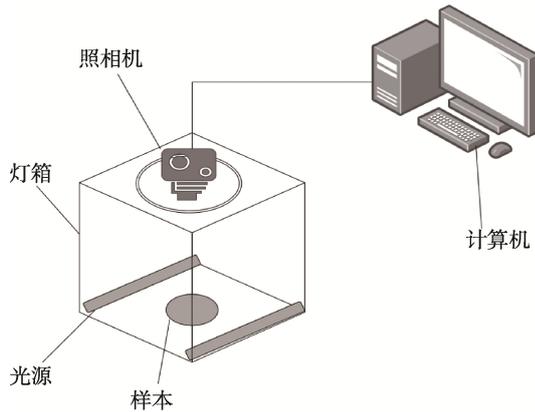


图1 计算机视觉硬件系统组成  
Fig.1 Composition of computer vision hardware system

图像预处理、图像分割、图像特征提取等步骤<sup>[46]</sup>，主要是对果蔬的颜色、形状和纹理等外观特征信息进行检测处理。

在图像预处理阶段，利用果蔬图像的增强、几何变换等操作消除图像中的冗余信息，恢复有用的真实信息，主要有图像增强、变换、灰度化处理等<sup>[47]</sup>。图像分割旨在将图像划分为组件区域或感兴趣区域，从而得到果蔬的形状和结构等信息，主要的分割方法类型有阈值分割、边缘分割、区域分割和基于分类的分割等<sup>[48]</sup>。特征提取对决定果蔬图像识别效果具有重要作用，果蔬成熟度图像处理技术需对果蔬成熟时的外观特征信息进行采集，采集后的图像信息包括果蔬的特征信息，以及采集过程中引入的噪音、环境背景等无关信息，因此需要利用多种图像处理方式进行图像分割，识别并提取有用的特征信息<sup>[49]</sup>。针对不同种类的水果可以采用不同的特征提取方法，如对苹果进行特征提取时，可以提取其几何特征，同一批次苹果的成熟度可能不同<sup>[50]</sup>。

### 2.3 果蔬成熟度的图像识别原理

在计算机视觉技术中，图像识别果蔬成熟度指将

采集得到的果蔬图片传输到计算机中，经过预处理、分割、特征提取等一系列操作后，根据结果做出果蔬成熟度的判别、识别和决策<sup>[51]</sup>。分类器设计及决策分类作为果蔬成熟度图像识别的关键步骤，主要以有效程序为依据来制定识别的规则，然后根据规律来识别果蔬图像<sup>[52]</sup>。分类器通过学习从训练集中提取的特征，并建立分类规则来创建分类模型<sup>[53]</sup>。常见的分类器算法包括逻辑回归、支持向量机、 $K$ 近邻、朴素贝叶斯、决策树等<sup>[54]</sup>。为了充分保证训练得到的分类模型具有高可靠性和高准确性，需要有足够多的训练样本和测试样本，来服从独立同分布<sup>[55]</sup>。果蔬成熟度图像处理与识别的一般流程<sup>[56]</sup>如图2所示。

## 3 果蔬成熟度图像处理与识别的研究现状

### 3.1 果蔬成熟度图像处理的主要技术

对于成熟过程中颜色变化明显的果蔬，采用图像处理技术的关键主要是对颜色空间进行变换，以及对颜色特征的提取。李莎等<sup>[57]</sup>通过对比 Lab、YCbCr、RGB 3 种颜色模型中的  $a$  分量 ( $a$  表示从洋红色至绿色的范围)、 $C_r$  分量 ( $C_r$  表示红色的浓度偏移量) 和  $r-b$  ( $r$  表示红色通道,  $b$  表示蓝色通道) 色差分量, 得出优先选用  $a$  分量来提取自然环境下成熟苹果颜色特征的结论。赵文锋等<sup>[58]</sup>将香蕉图像从 RGB 颜色空间转化成 HIS 颜色空间, 依据香蕉色素组成检测出不同成熟度的香蕉, 并得出由于操作设备和外部环境等影响因素导致判断香蕉成熟度的误差的结论。

也有研究根据颜色分量或颜色阈值对室外环境和室内环境的成熟果蔬进行图像分割。例如, 吴庆岗等<sup>[59]</sup>利用  $a$  分量的变化范围从红色到绿色的特点, 提出了一种基于 Lab 颜色空间的  $K$  近邻分割算法, 该算法是一种基于统计的数据挖掘算法, 可精准分割自然环境下苹果的图像, 较好地规避了阴影和光照不均

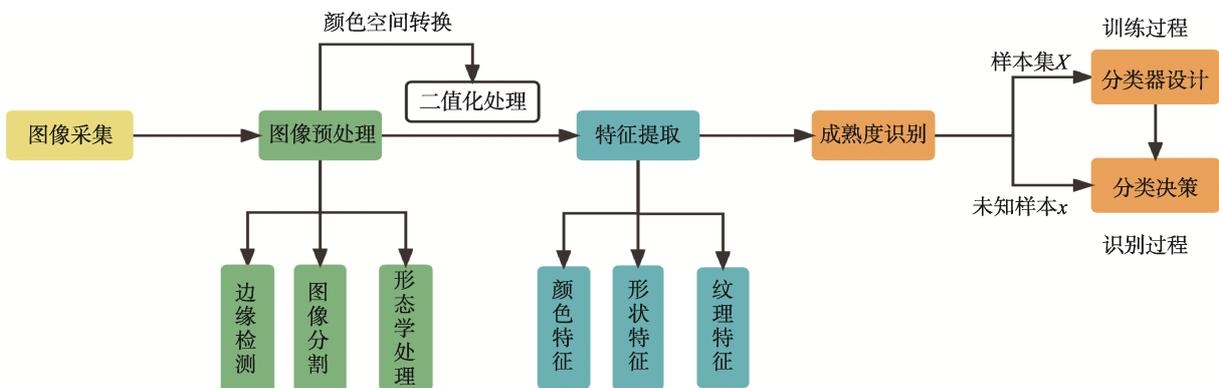


图2 果蔬成熟度图像处理与识别一般流程  
Fig.2 General process of image processing and recognition of fruit and vegetable maturity

等因素对图像分割的影响。伍荃芮等<sup>[60]</sup>从温室大棚中采集到番茄果实的图像, 并将图像转化为 RGB 模型, 然后人工划分阈值, 并提取番茄果实的坐标, 对番茄成熟的 4 个时期(绿熟期、中熟期、坚熟期、完熟期)进行识别。结果表明, 采用人工提取的阈值对坚熟期和完熟期的番茄果实的识别成功率达到 100%。

### 3.2 果蔬成熟度图像识别的主要技术

随着计算机信息技术的发展, 机器学习已深度融合计算机视觉技术, 在图像识别领域的研究愈加深入。Castro 等<sup>[61]</sup>结合机器学习技术和颜色空间对醋栗果实进行了成熟度检测, 结果表明, 结合颜色空间与机器学习技术, 能准确识别醋栗果实的成熟程度。与传统方法相比, 深度学习作为一种特殊的机器学习, 具有不需要人为提取果蔬的图像特征, 而是利用网络结构来提取更精确的果蔬图像特征的优势<sup>[62]</sup>。

相较于逻辑回归、支持向量机、K 近邻、朴素贝叶斯、决策树等分类器算法, 以神经网络为架构的深度学习算法能自动学习大量图像数据中的特征, 并将这些特征与分类器关联<sup>[63]</sup>。该应用改变了传统计算机视觉技术中复杂的特征提取过程, 通过把原始图片输入神经网络, 便可提取到有用的特征信息<sup>[64]</sup>, 有效提高了复杂图像识别的准确率。当前, 果蔬成熟度识别的研究热点是利用深度学习中的神经网络(Artificial neural networks, ANN)、BP 神经网络(Back propagation neural network, BPNN)、卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)等进行成熟度检测。BPNN 是一种多层前馈神经网络, 以梯度下降法为基本思想进行反向传播训练, 是当下应用最广的一种人工神经网络<sup>[65]</sup>。CNN 是一种特殊的深层前馈网络, 其每层特征都由上一层的局部区域卷积核激励得到, 因而相较于其他神经网络方法, CNN 更适合应用于学习和表达图像特征<sup>[66]</sup>。

根据成熟度与表皮颜色之间存在相关性的特点提取颜色信息, 并结合神经网络方法对果蔬成熟度的识别率较高。ANN 是模拟人类大脑的神经网络结构和功能特征的一种数据处理模型<sup>[67]</sup>。Mazen 等<sup>[68]</sup>提出了一种自动识别香蕉成熟阶段的计算机视觉系统, 采用基于 ANN 的框架, 利用颜色、褐斑发育和 Tammura 统计纹理特征对香蕉果实的成熟阶段进行分类和分级, 总体识别率达到 97.75%。Kheiralipour 等<sup>[69]</sup>采用线性判别分析、二次判别分析和 ANN 将野生开心果分为 4 个成熟度等级, 包括初始未成熟、次级未成熟、成熟和过熟, 分别实现了 93.75%、97.5%、100% 的正确分类率。

随着神经网络技术的成熟, 在图像识别领域, BPNN 基于识别模型进行自我训练, 能够有效排除图像噪声<sup>[70]</sup>, 在果蔬成熟度上的识别效果良好, 结构如图 3 所示。吕琛<sup>[71]</sup>利用哈密瓜的色度信息判断其成熟

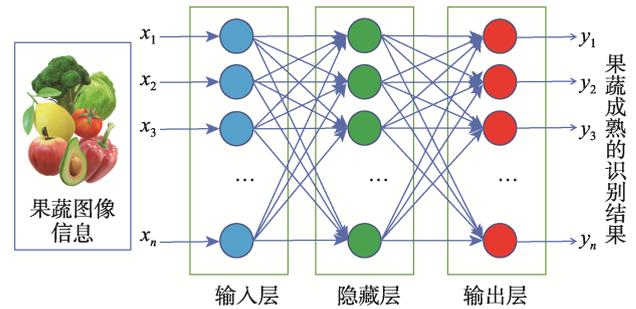


图 3 果蔬成熟度识别中 BP 神经网络结构  
Fig.3 Structure of BP neural network in fruit and vegetable maturity recognition

度, 并利用哈密瓜侧面的色度频度值, 采用 BPNN 结合主成分分析法, 其分类精度可达 96.25%, 克服了人工对哈密瓜成熟度分级的主观、费时及有损判断等不足。赵玲等<sup>[72]</sup>结合 BPNN, 根据不同成熟度草莓的颜色特征对草莓成熟度等级进行判断, 其正确率达到 90% 以上。

基于局部连接、权值共享及池化操作等特性, CNN 有效降低了网络的复杂度, 减少了训练参数的数目, 易于训练和优化<sup>[73]</sup>, 可有效提高果蔬成熟度的识别效率, 其结构如图 4 所示。Saranya 等<sup>[74]</sup>使用原始图像和增强图像对提出的 CNN 模型进行训练和测试, 总体验证准确率为 96.14%。YOLO 系列网络是基于回归实现目标定位与预测目标分类的 CNN 检测方法, 具有识别速度快、实时性良好、准确率高等优点<sup>[75]</sup>。刘振<sup>[76]</sup>利用机器学习中的 YOLOv3 和改进后的 LeNet-5 网络对自然环境下的番石榴进行成熟度检测, 其识别和分类的准确率为 91.1%。陈伟等<sup>[77]</sup>运用 YOLOv5s 检测算法对番茄图像进行识别, 整体成熟度的识别精确率为 95%, 提高了采摘机器人识别番茄成熟果实的准确率。熊俊涛等<sup>[78]</sup>在复杂果园环境下, 基于 YOLOv5-Lite 目标检测算法对木瓜成熟度进行检测, 准确率达到 89.7%。

常用的图像特征有颜色、纹理、形状等底层视觉特征。对于成熟过程中颜色变化不明显的果蔬, 如黄瓜, 目前应主要基于形状特征对黄瓜成熟度进行识别<sup>[79]</sup>。梁帆等<sup>[80]</sup>通过分割出叶冠投影图像和植株侧面图像

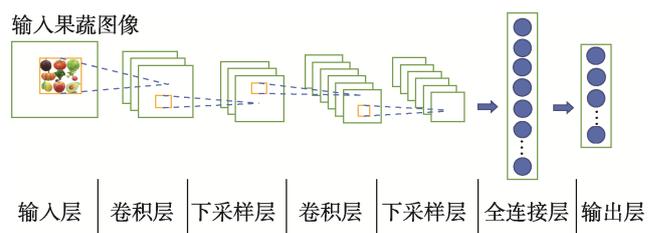


图 4 果蔬成熟度识别中卷积神经网络结构  
Fig.4 Convolutional neural network structure in fruit and vegetable maturity recognition

轮廓,提取得到油菜的形态特征信息,利用BPNN训练采集的样本数据,实现了基于BPNN模型的蔬菜成熟度等级测定,在不破坏油菜植株的情况下,其成熟度的检测准确率达到95%。梁帆等<sup>[81]</sup>融合BPNN与贝叶斯信息来检测小白菜的成熟度,提取了小白菜根系形态特征和地上部分形态特征,其总体成熟度检测准确率为91.75%。

综述以上果蔬成熟度识别技术的研究现状,总结了参考文献中的技术方法及识别精度,如表2所示。

## 4 果蔬成熟度图像处理与识别的应用现状

### 4.1 采摘前后的成熟度监测

目前,针对果蔬成熟度的数字监测主要应用于果蔬采摘领域,通过识别果蔬外观图像来判断是否采摘。崔明等<sup>[82]</sup>研究了草莓成熟度检测技术,根据草莓在成熟过程中颜色由绿色向红色转变的特征,提取Lab颜色空间特征下的a颜色特征分量,以提高成熟草莓目标和背景的对比度,基于此开发的检测系统在草莓采摘前就可进行实时在线检测。

自然采摘环境包含复杂的场景和不断变化的照明。张小花等<sup>[83]</sup>采用能区分背景颜色与柑橘颜色的a分量和霍夫圆变换法来处理成熟柑橘,实现了快速自动识别柑橘的成熟度与柑橘产量的预估。苹果采摘机器人利用目标识别算法对苹果图像进行分割识别,并定位到成熟果实,可在不损害果实和树的情况下从树上分离果实<sup>[84]</sup>。

### 4.2 采摘后的运输及贮藏的成熟度监测

果蔬在采摘后存在乙烯催熟、呼吸作用、休眠等生理现象<sup>[85]</sup>。根据果蔬易腐烂变质的特性,最好采用冷链运输包装,利用制冷技术或制冷设备,让果蔬在物流过程中保持适当的低温,使得果蔬处于低温环境,从而降低损耗<sup>[86]</sup>。基于计算机视觉技术来实现果蔬成熟品质的快速、无损、实时监测和检测,开展果蔬流通品质控制方法体系的研究,有利于消除果蔬冷链运输包装发展的制约因素<sup>[87]</sup>。为了在复杂的背景和室内环境中检测哈斯鳄梨的成熟过程,Jaramillo-Acevedo等<sup>[88]</sup>利用各种数字图像处理技术,并采用ANN,提出了哈斯鳄梨果实采后消费成熟度分类方法,该研究提出允许识别收获后第11天哈斯鳄梨的成熟状态,且分析数据集的分类准确率达到88%。刘海军等<sup>[89]</sup>根据香蕉图像信息特征和人工神经网络建立了一种香蕉成熟度检测模型,准确率高,且可靠性和泛化能力较强,为香蕉分拣、保鲜等提供了技术参考。Bonora等<sup>[90]</sup>利用卷积神经网络检测采后梨的成熟度,旨在调整梨采摘后的储存技术,有利于实现不同冷藏室中识别和分类梨的成熟度。

当前,基于物联网技术的果蔬图像识别成为果蔬农产品冷链物流的新发展方向,Chen等<sup>[91]</sup>探讨了农业物联网背景下水果成熟度的图像识别,引入了水果图像融合算法,将监测系统在同一场景拍摄的多幅图像合成为更高质量的新图像,全方位展示了果实的成熟度,为果蔬采摘后成熟度的仓储及物流过程监测提供了重要手段。目前,将图像处理和图像识别应用于果蔬采后的运输、贮藏仍处于研究阶段。

表2 有关结合深度学习在果蔬成熟度识别上的研究

Tab.2 Research on recognition of fruit and vegetable maturity combined with deep learning

类别	方法	精度/%	参考文献
香蕉	人工神经网络(ANN)	97.75	[68]
	线性判别分析(LDA)	93.75	
野生开心果	二次判别分析(QDA)	97.5	[69]
	人工神经网络(ANN)	100	
哈密瓜	BP神经网络(BPNN)结合主成分分析法	96.25	[71]
草莓	BP神经网络(BPNN)	>90	[72]
香蕉	卷积神经网络(CNN)	96.14	[74]
番石榴	YOLOv3和改进后的LeNet-5网络(CNN)	91.1	[76]
番茄	YOLOv5s检测算法(CNN)	95	[77]
木瓜	YOLOv5-Lite目标检测算法(CNN)	89.7	[78]
油菜	BP神经网络(BPNN)	95	[80]
小白菜	BP神经网络(BPNN)与贝叶斯信息融合	91.75	[81]

## 5 结语

与其他果蔬成熟度的无损检测技术相比,采用基于图像处理与识别的计算机视觉检测技术在颜色、纹理等外部特征变化明显的果蔬上进行成熟度检测具有较大的优势。目前,基于颜色空间变换、颜色特征提取,根据颜色分量和阈值对果蔬图像进行分割,研究人员已进行了大量研究,利用深度学习中的神经网络对果蔬成熟度识别已成为当前的研究热点,但在果蔬成熟度图像处理和识别方面仍存在以下几方面的问题。

1) 实际操作设备和外部环境因素会影响所采集图像的质量,从而增大判断果蔬成熟度的误差。

2) 只能捕捉果蔬的表观信息,无法得到其内部信息,这对于成熟度的准确度判断存在局限性。结合其他无损检测技术对果蔬成熟度进行识别的研究仍处于起步阶段。

3) 对于颜色特征变化明显的果蔬成熟度的研究较成熟,但针对其他成熟过程中颜色变化不明显但纹理特征和形状特征明显变化的果蔬的相关研究较少,在广度和深度方面有待进一步加强。

4) 目前的研究主要集中于果蔬成熟度图像处理和识别在采摘上的应用,针对运输、售卖过程中成熟度的监测仍较少,部分领域仍处于空白状态。同时,开展动态实时检测研究是今后有待解决的难题。

5) 目前,大部分研究与应用都只针对单一果蔬种类的成熟度识别,缺少对多种类果蔬成熟度图像处理与识别的系统研究。

基于以上问题,深度学习方法对果蔬成熟度图像处理和图像识别具有更好的鲁棒性、更高的准确性,结合其他无损检测技术获取内部信息,借助卷积神经网络改进分类器,训练多种类果蔬多场景样本集,实现动态实时检测果蔬成熟度具有广阔的发展前景。

随着图像处理和识别技术的深入发展,结合神经网络的研究在果蔬成熟度检测领域将有望获得突破,与此同时还将催生出更多新的应用场景。

### 参考文献:

- [1] 杨景惠,孙郡,宋勋禹,等. 发酵果蔬营养组分与健康功效的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 332-339.  
YANG J H, SUN J, SONG X Y, et al. Research Progress on Nutritional Components and Potential Health Benefits of Fermented Fruits and Vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 332-339.
- [2] 刘成成. 基于农业信息化的现代农业发展与展望[J]. 南方农机, 2023, 54(7): 171-173.  
LIU C C. Development and Prospect of Modern Agriculture Based on Agricultural Informatization[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 171-173.
- [3] 林旭凤. 分析计算机技术在智慧农业中的应用[J]. 河北农业, 2023(1): 92-93.  
LIN X F. Application of Analytical Computer Technology in Intelligent Agriculture[J]. Hebei Agriculture, 2023(1): 92-93.
- [4] 李希桐,赵玲. 新时期计算机信息技术在信息农业发展中的应用[J]. 黑龙江粮食, 2022(11): 55-57.  
LI X T, ZHAO L. Application of Computer Information Technology in the Development of Information Agriculture in the New Period[J]. Heilongjiang Grain, 2022(11): 55-57.
- [5] 吴冀豪,常玉祥,汪宇玲,等. 基于机器学习的果蔬识别研究综述[J]. 机器人技术与应用, 2022(4): 29-31.  
WU J H, CHANG Y X, WANG Y L, et al. Review of Research on Fruit and Vegetable Recognition Based on Machine Learning[J]. Robot Technique and Application, 2022(4): 29-31.
- [6] 王丹丹,宋怀波,何东健. 苹果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 59-69.  
WANG D D, SONG H B, HE D J. Research Advance on Vision System of Apple Picking Robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 59-69.
- [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 Q, TU Z Y, CHEN C, et al. Application of Computer Vision Technology in the Food Quality Inspection[J]. Food Research and Development, 2020, 41(16): 208-213.
- [8] HU J, FAN C, WANG Z P, et al. Fruit Detection and Counting in Apple Orchards Based on Improved Yolov7 and Multi-Object Tracking Methods[J]. Sensors, 2023, 23(13): 5903.
- [9] 潘梅. 图像识别在果蔬分类与识别中的应用[J]. 现代农业科技, 2021(16): 257-259.  
PAN M. Application of Image Recognition in Classification and Recognition of Fruits and Vegetables[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(16): 257-259.
- [10] 许成浩,李苇杭,郑鉴汝,等. 基于深度学习的智能果蔬秤研究与设计[J]. 科技资讯, 2019, 17(15): 11-12.  
XU C H, LI W H, ZHENG J R, et al. Research and Design of Intelligent Fruit and Vegetable Scale Based on Deep Learning[J]. Science & Technology Information,

- 2019, 17(15): 11-12.
- [11] 胡庆胜, 符亚云, 牛金星. 采摘机器人视觉系统的目标识别提取研究[J]. 河南科技, 2020, 39(25): 5-8.  
HU Q S, FU Y Y, NIU J X. Research on Target Recognition Extraction of Picking Robot Vision System[J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(25): 5-8.
- [12] 张卫山, 吕浩, 张元杰, 等. 深度学习驱动的智能冰箱[J]. 计算机科学与探索, 2019, 13(1): 106-115.  
ZHANG W S, LV H, ZHANG Y J, et al. Deep Learning Based Smart Refrigerator[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2019, 13(1): 106-115.
- [13] 杨福康. 计算机图像处理技术的应用与分析[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(35): 10-13.  
YANG F K. Application and Analysis of Computer Image Processing Technology[J]. Computer Knowledge and Technology, 2022, 18(35): 10-13.
- [14] 张瑞宇, 刘顺淑. 计算机视觉技术在果蔬采后处理中的应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2004, 21(5): 497-501.  
ZHANG R Y, LIU S S. Researches and Applications of Computer Vision Technique in Fruit and Vegetables' Commercialization after Harvesting[J]. Journal of Yuzhou University (Natural Sciences Edition), 2004, 21(5): 497-501.
- [15] 刘志刚, 王丽娟, 喜冠南, 等. 水果成熟度检测技术的现状与发展[J]. 农业与技术, 2020, 40(8): 17-21.  
LIU Z G, WANG L J, XI G N, et al. Present Situation and Development of Fruit Maturity Detection Technology[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(8): 17-21.
- [16] 盛晶晶. 信息化技术在温室蔬菜种植中的应用分析[J]. 农业工程技术, 2021, 41(36): 53-54.  
SHENG J J. Analysis on the Application of Information Technology in Greenhouse Vegetable Planting[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(36): 53-54.
- [17] 宋梦圆, 宁国法, 田永强, 等. 不同成熟度番茄果实贮藏期间的品质变化[J]. 中国蔬菜, 2023(2): 45-50.  
SONG M Y, NING G F, TIAN Y Q, et al. Quality Changes of Tomato Fruits with Different Maturity during Storage[J]. China Vegetables, 2023(2): 45-50.
- [18] 邱珊莲, 林宝妹, 张少平, 等. 不同成熟期番石榴果实品质特征与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9230-9238.  
QIU S L, LIN B M, ZHANG S P, et al. Quality Characteristics and Evaluation of Guava Fruit at Different Maturity Stages[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(24): 9230-9238.
- [19] 黎丽莎, 刘燕德, 胡军, 等. 近红外无损检测技术在水果成熟度判别中的应用研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 95-105.  
LI L S, LIU Y D, HU J, et al. Application of near Infrared Nondestructive Testing Technology in Fruit Maturity Discrimination[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 95-105.
- [20] 薛晓敏, 韩雪平, 王贵平, 等. 不同成熟度对李果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2020, 38(3): 26-36.  
XUE X M, HAN X P, WANG G P, et al. Effects of Different Maturities on Characteristics of Plum Fruit Quality[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3): 26-36.
- [21] 高丽, 龙勇, 李红章, 等. 采收成熟度对晚熟大雅柑橘品质特性及其风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 140-148.  
GAO L, LONG Y, LI H Z, et al. Effects of Harvest Maturity on Quality and Flavor of Late-Maturing Daya Citrus[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(22): 140-148.
- [22] ZHU Q B, HE C L, LU R F, et al. Ripeness Evaluation of 'Sun Bright' Tomato Using Optical Absorption and Scattering Properties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 103: 27-34.
- [23] 耿阳, 赵晓梅, 谭玉鹏, 等. 采收成熟度对'京沧1号'枣贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 269-275.  
GENG Y, ZHAO X M, TAN Y P, et al. Effects of Harvest Maturity on Storage Quality and Antioxidative Capacity of Ziziphus Jujuba 'Jingcang1'[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 269-275.
- [24] 李志成, 郑晓冬, 闫新焕, 等. 果蔬品质无损检测技术研究进展[J]. 中国果菜, 2021, 41(3): 34-40.  
LI Z C, ZHENG X D, YAN X H, et al. Research Progress of Nondestructive Testing Technologies for Fruit and Vegetable Quality[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(3): 34-40.
- [25] 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 Y, ZHOU X Q, YU X F, 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.
- [26] 罗印斌, 蔡艳丽, 兰菡, 等. 农产品无损检测方法应用现状[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 340-344.  
LUO Y B, CAI Y L, LAN H, et al. Application Status of Nondestructive Testing Methods for Agricultural Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 340-344.

- [27] 邹攀,白雪,陈秋生,等.无损检测技术在果蔬品质评价中应用的研究进展[J].安徽农业科学,2021,49(2):1-4.  
ZOU P, BAI X, CHEN Q S, et al. Research Progress on the Application of Non-Destructive Testing Technology in Fruits and Vegetables Quality Evaluation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 1-4.
- [28] 刘非凡.水果无损检测技术综述[J].食品安全导刊,2023(6):136-138.  
LIU F F. A Review of Fruit Nondestructive Testing Techniques[J]. China Food Safety Magazine, 2023(6): 136-138.
- [29] 孙梦梦,鞠皓,姜洪喆,等.水果成熟度无损检测技术研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(17):354-362.  
SUN M M, JU H, JIANG H Z, et al. Research Progress of Nondestructive Detection Technology in Fruit Maturity[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 354-362.
- [30] 刘橙,刘广同,何金成,等.基于介电特性的水果成熟度无损检测研究进展[J].农业工程,2021,11(12):49-53.  
LIU C, LIU G T, HE J C, et al. Research Progress of Nondestructive Testing of Fruit Maturity Based on Dielectric Properties[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(12): 49-53.
- [31] 任二芳,牛德宝,温立香,等.电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展[J].食品工业,2019,40(10):261-264.  
REN E F, NIU D B, WEN L X, et al. Application Research Progress of Electronic Nose and Electronic Tongue in Fruits Detection[J]. The Food Industry, 2019, 40(10): 261-264.
- [32] 宋雪健,王洪江,张东杰,等.基于近红外光谱技术的水果品质检测研究进展[J].无损检测,2017,39(10):71-75.  
SONG X J, WANG H J, ZHANG D J, et al. Research Progress of Fruit Quality Detection Based on near Infrared Spectroscopy[J]. Nondestructive Testing Technology, 2017, 39(10): 71-75.
- [33] 陈龙跃,段丹丹,王凡,等.高光谱成像技术在水果品质无损检测中的研究进展[J].广东农业科学,2023,50(7):83-94.  
CHEN L Y, DUAN D D, WANG F, et al. Research Progress of Non-Destructive Testing of Fruit Quality by Hyperspectral Imaging Technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(7): 83-94.
- [34] 郑太雄,江明哲,冯明驰.基于视觉的采摘机器人目标识别与定位方法研究综述[J].仪器仪表学报,2021,42(9):28-51.  
ZHENG T X, JIANG M Z, FENG M C. Vision Based Target Recognition and Location for Picking Robot: A Review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 28-51.
- [35] 李子文,张海红,马雪莲,等.灵武长枣的成熟度与其电学特性关系研究[J].食品科技,2015,40(10):286-290.  
LI Z W, ZHANG H H, MA X L, et al. Relationships between Ling-Wu Long Jujube Maturity and Dielectric Properties[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(10): 286-290.
- [36] TYAGI P, SEMWAL R, SHARMA A, et al. E-Nose: A Low-Cost Fruit Ripeness Monitoring System[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022(1): 1-41.
- [37] 吴德刚,赵利平,陈乾辉.基于近红外光谱的大枣成熟度无损检测方法[J].激光杂志,2023,44(7):212-217.  
WU D G, ZHAO L P, CHEN Q H. Nondestructive Testing Method of Jujube Maturity Based on near Infrared Spectroscopy[J]. Laser Journal, 2023, 44(7): 212-217.
- [38] YANG C, LEE W S, GADER P. Hyperspectral Band Selection for Detecting Different Blueberry Fruit Maturity Stages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 23-31.
- [39] 闵巍庆,刘林虎,刘宇昕,等.食品图像识别方法综述[J].计算机学报,2022,45(3):542-566.  
MIN W Q, LIU L H, LIU Y X, et al. A Survey on Food Image Recognition[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(3): 542-566.
- [40] STEINBRENER J, POSCH K, LEITNER R. Hyperspectral Fruit and Vegetable Classification Using Convolutional Neural Networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 364-372.
- [41] 薛建新,张淑娟,张晶晶.基于高光谱成像技术的沙金杏成熟度判别[J].农业工程学报,2015,31(11):300-307.  
XUE J X, ZHANG S J, ZHANG J J. Ripeness Classification of Shajin Apricot Using Hyperspectral Imaging Technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 300-307.
- [42] 章炜.机器视觉技术发展及其工业应用[J].红外,2006,27(2):11-17.  
ZHANG W. Development of Machine Vision and Its Industrial Applications[J]. Infrared, 2006, 27(2): 11-17.
- [43] 黄藩,刘飞,王云,等.计算机视觉技术在茶叶领域中的应用现状及展望[J].茶叶科学,2019,39(1):

- 81-87.  
HUANG F, LIU F, WANG Y, et al. Research Progress and Prospect on Computer Vision Technology Application in Tea Production[J]. *Journal of Tea Science*, 2019, 39(1): 81-87.
- [44] 周宝仓, 吕金龙, 肖铁忠, 等. 机器视觉技术研究现状及发展趋势[J]. *河南科技*, 2021, 40(31): 18-20.  
ZHOU B C, LYU J L, XIAO T Z, et al. Research Status and Development Trend of Machine Vision Technology[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(31): 18-20.
- [45] 李观发. 基于计算机视觉算法的图像处理技术探析[J]. *信息记录材料*, 2019, 20(6): 125-126.  
LI G F. Analysis of Image Processing Technology Based on Computer Vision Algorithm[J]. *Information Recording Materials*, 2019, 20(6): 125-126.
- [46] 吴少霜, 赵纯, 朱亚男, 等. 数字图像处理技术在果蔬分级检测中的应用[J]. *福建农机*, 2021(3): 30-36.  
WU S S, ZHAO C, ZHU Y N, et al. Application of Digital Image Processing Technology in Fruit and Vegetable Grading Detection[J]. *Fujian Agricultural Machinery*, 2021(3): 30-36.
- [47] 刘勍, 张亚亚, 黄金, 等. 水果图像处理技术应用及其展望[J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(4): 36-44.  
LIU Q, ZHANG Y Y, HUANG J, et al. Applications and Prospects of Fruit Image Processing Technology[J]. *Journal of Qinghai Normal University (Natural Science)*, 2022, 38(4): 36-44.
- [48] ZHANG B H, HUANG W Q, LI J B, et al. Principles, Developments and Applications of Computer Vision for External Quality Inspection of Fruits and Vegetables: A Review[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 326-343.
- [49] 王志宇. 基于 RGB 图像检测的水果分拣控制算法研究[J]. *农机化研究*, 2022, 44(3): 38-42.  
WANG Z Y. Design of Fruit Sorting Control Algorithm Based on RGB Image Detection[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(3): 38-42.
- [50] 何文斌, 魏爱云, 明五一, 等. 基于机器视觉的水果品质检测综述[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(11): 10-16.  
HE W B, WEI A Y, MING W Y, et al. Survey of Fruit Quality Detection Based on Machine Vision[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(11): 10-16.
- [51] 刘鹏, 庄卫东. 图像识别技术在农业中的应用浅析[J]. *现代化农业*, 2021(12): 20-21.  
LIU P, ZHUANG W D. Application of Image Recognition Technology in Agriculture[J]. *Modernizing Agriculture*, 2021(12): 20-21.
- [52] 孟广仕. 图像识别技术在人工智能中的应用[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2018(12): 152-153.  
MENG G S. Application of Image Recognition Technology in Artificial Intelligence[J]. *China Computer & Communication*, 2018(12): 152-153.
- [53] HWANG S W, SUGIYAMA J. Computer Vision-Based Wood Identification and Its Expansion and Contribution Potentials in Wood Science: A Review[J]. *Plant Methods*, 2021, 17(1): 47.
- [54] BONDRE S, PATIL D. Recent Advances in Agricultural Disease Image Recognition Technologies: A Review[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2023, 35(9): e7644.
- [55] 庄福振, 罗平, 何清, 等. 迁移学习研究进展[J]. *软件学报*, 2015, 26(1): 26-39.  
ZHUANG F Z, LUO P, HE Q, et al. Survey on Transfer Learning Research[J]. *Journal of Software*, 2015, 26(1): 26-39.
- [56] 苟园旻, 闫建伟, 张富贵, 等. 水果采摘机器人视觉系统与机械手研究进展[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(9): 13-26.  
GOU Y M, YAN J W, ZHANG F G, et al. Research Progress on Vision System and Manipulator of Fruit Picking Robot[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(9): 13-26.
- [57] 李莎, 钱建平, 赵春江, 等. 不同颜色模型识别成熟苹果图像的比较分析[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(6): 1545-1550.  
LI S, QIAN J P, ZHAO C J, et al. Comparing and Analyzing Different Color Models on Ripe Apple Image Identification[J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(6): 1545-1550.
- [58] 赵文锋, 朱菊霞, 董杰. 基于图像处理的香蕉成熟度检测系统[J]. *现代农业装备*, 2016(5): 33-36.  
ZHAO W F, ZHU J X, DONG J. Image Processing System Based on Detection of Banana Maturity[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2016(5): 33-36.
- [59] 吴庆岗, 张卫国, 李灿林, 等. 自然环境下基于 Lab 空间的成熟苹果图像分割[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(9): 177-179.  
WU Q G, ZHANG W G, LI C L, et al. Mature Apple Image Segmentation Based on Lab Space in Natural Environment[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(9): 177-179.
- [60] 伍莹芮, 张志勇, 韩小平, 等. 基于图像处理技术的

- 番茄成熟度检测研究[J]. 农业技术与装备, 2021(4): 50-51.
- WU Y R, ZHANG Z Y, HAN X P, et al. Research on Tomato Maturity Detection Based on Image Processing Technology[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(4): 50-51.
- [61] CASTRO W, OBLITAS J, DE-LA-TORRE M, et al. Classification of Cape Gooseberry Fruit According to Its Level of Ripeness Using Machine Learning Techniques and Different Color Spaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 27389-27400.
- [62] 廉小亲, 成开元, 安飒, 等. 基于深度学习和迁移学习的水果图像分类[J]. 测控技术, 2019, 38(6): 15-18.
- LIAN X Q, CHENG K Y, AN S, et al. Fruit Image Classification Based on Deep Learning and Transfer Learning[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(6): 15-18.
- [63] 张松兰. 基于卷积神经网络的图像识别综述[J]. 西安航空学院学报, 2023, 41(1): 74-81.
- ZHANG S L. A Review of Image Recognition Based on Convolutional Neural Network[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2023, 41(1): 74-81.
- [64] 郑凯, 方春. 基于迁移学习的果蔬质量分类研究[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2021, 14(2): 220-228.
- ZHENG K, FANG C. Research on Quality Classification of Fruits and Vegetables Based on Transfer Learning[J]. Highlights of Sciencepaper Online, 2021, 14(2): 220-228.
- [65] 周梦, 吕志刚, 邸若海, 等. 基于小样本数据的BP神经网络建模[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2754-2760.
- ZHOU M, LÜ Z G, DI R H, et al. BP Neural Network Modeling Based on Small Sample Data[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2754-2760.
- [66] 李彦冬, 郝宗波, 雷航. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机应用, 2016, 36(9): 2508-2515.
- LI Y D, HAO Z B, LEI H. Survey of Convolutional Neural Network[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(9): 2508-2515.
- [67] 姜鹏飞, 于文静, 孙娜, 等. 人工神经网络在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 188-196.
- JIANG P F, YU W J, SUN N, et al. Application of Artificial Neural Network in Food Industry[J]. Food Research and Development, 2021, 42(13): 188-196.
- [68] MAZEN F M A, NASHAT A A. Ripeness Classification of Bananas Using an Artificial Neural Network[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(8): 6901-6910.
- [69] KHEIRALIPOUR K, NADIMI M, PALIWAL J. Development of an Intelligent Imaging System for Ripeness Determination of Wild Pistachios[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7134.
- [70] 施强. 基于BP神经网络的计算机图像智能识别方法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2022(10): 134-137.
- SHI Q. Intelligent Recognition Method of Computer Image Based on BP Neural Network[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2022(10): 134-137.
- [71] 吕琛. 基于数字图像处理的哈密瓜成熟度无损检测技术研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 17-41.
- (LÜ/LV/LU/LYU) C. Research on Non-Destructive Detection Technology of Hami Melon Maturity Based on Digital Image Processing[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014: 17-41.
- [72] 赵玲, 周桂红. 基于颜色特征的草莓成熟度识别技术研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(2): 97-101.
- ZHAO L, ZHOU G H. Study on Recognition Technology of Strawberry Maturity Based on Color Feature[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(2): 97-101.
- [73] 周飞燕, 金林鹏, 董军. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 2017, 40(6): 1229-1251.
- ZHOU F Y, JIN L P, DONG J. Review of Convolutional Neural Network[J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(6): 1229-1251.
- [74] SARANYA N, SRINIVASAN K, PRAVIN KUMAR S K. Banana Ripeness Stage Identification: A Deep Learning Approach[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2022, 13(8): 4033-4039.
- [75] 刘芳, 刘玉坤, 林森, 等. 基于改进型YOLO的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 229-237.
- LIU F, LIU Y K, LIN S, et al. Fast Recognition Method for Tomatoes under Complex Environments Based on Improved YOLO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 229-237.
- [76] 刘振. 自然环境下番石榴的视觉识别及成熟度检测技术[D]. 广州: 华南农业大学, 2019: 19-41.
- LIU Z. Visual Recognition and Maturity Detection Technology of Guava in Natural Environment[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019: 19-41.
- [77] 陈伟, 张春雨, 朱超冉. 基于YOLOv5s算法的番茄成熟度识别研究[J]. 安徽科技学院学报, 2023, 37(1): 92-95.
- CHEN W, ZHANG C Y, ZHU C R. Research on Tomato

- Maturity Recognition Based on YOLOv5s Algorithm[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2023, 37(1): 92-95.
- [78] 熊俊涛, 霍钊威, 黄启寅, 等. 结合主动光源和改进 YOLOv5s 模型的夜间环境柑橘检测方法[J]. 华南农业大学学报, 2024(1): 1-19.  
XIONG Jun-tao, HUO Zhao-wei, HUANG Qi-yin, et al. Citrus Detection Method in Nighttime Environment Combined with Active Light Source and Improved YOLOv5s Model[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023(1): 1-19.
- [79] 鲍官军, 荀一, 戚利勇, 等. 机器视觉在黄瓜采摘机器人中的应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(1): 114-118.  
BAO G J, XUN Y, QI L Y, et al. Research on the Application of Machine Vision in Cucumber Picking Robots[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(1): 114-118.
- [80] 梁帆, 杨莉莉, 崔世钢, 等. 基于神经网络的油菜成熟度等级视觉检测方法[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 403-405.  
LIANG F, YANG L L, CUI S G, et al. Visual Detection Method of Rape Maturity Level Based on Neural Network[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 403-405.
- [81] 梁帆, 孙更强, 王宇, 等. 基于神经网络与贝叶斯信息融合的小白菜成熟度检测方法[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(1): 202-204.  
LIANG F, SUN G Q, WANG Y, et al. Detection Method of Pakchoi Maturity Based on Neural Network and Bayesian Information Fusion[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(1): 202-204.
- [82] 崔明, 蒋其友, 薛小松. 基于图像处理的成熟草莓检测技术研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(23): 15-18.  
CUI M, JIANG Q Y, XUE X S. Research on Detection Technology of Mature Strawberries Based on Image Processing[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(23): 15-18.
- [83] 张小花, 马瑞峻, 吴卓葵, 等. 基于机器视觉的果园成熟柑橘快速识别及产量预估研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(7): 156-161.  
ZHANG X H, MA R J, WU Z K, et al. Fast Detection and Yield Estimation of Ripe Citrus Fruit Based on Machine Vision[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(7): 156-161.
- [84] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 1-15.  
CHEN Q, YIN C K, GUO Z L, et al. Current Status and Future Development of the Key Technologies for Apple Picking Robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(4): 1-15.
- [85] 纪玉恩. 果蔬采后品质影响因素及对冷库管理的启发[J]. 中国果菜, 2016, 36(11): 4-8.  
JI Y E. Effect Factors on Post-Harvest Quality of Fruits and Vegetables and Inspiration to the Construction of Cold Storage[J]. China Fruit Vegetable, 2016, 36(11): 4-8.
- [86] 李婷. 智能包装技术在果蔬农产品包装中的应用研究[J]. 科技与创新, 2023(9): 49-51.  
LI T. Research on the Application of Intelligent Packaging Technology in the Packaging of Fruit and Vegetable Agricultural Products[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(9): 49-51.
- [87] 杨天阳, 田长青, 刘树森. 生鲜农产品冷链储运技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 37-44.  
YANG T Y, TIAN C Q, LIU S S. Technology and Equipment for Cold-Chain Storage and Transportation of Fresh Agricultural Products[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 37-44.
- [88] JARAMILLO-ACEVEDO C A, CHOQUE-VALDERRAMA W E, GUERRERO-ÁLVAREZ G E, et al. Hass Avocado Ripeness Classification by Mobile Devices Using Digital Image Processing and ANN Methods[J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(12): 161-201.
- [89] 刘海军, 赵文锋, 刘韵锋, 等. 基于 ANN 和贝叶斯优化算法的香蕉成熟度检测模型研究[J]. 现代农业装备, 2021, 42(5): 42-46.  
LIU H J, ZHAO W F, LIU Y F, et al. Model for Detecting Banana Maturity Based on Artificial Neural Network and Bayesian Optimization Algorithm[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(5): 42-46.
- [90] BONORA A, BORTOLOTTI G, BRESILLA K, et al. A Convolutional Neural Network Approach to Detecting Fruit Physiological Disorders and Maturity in 'Abbé Fétel' Pears[J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 264-272.
- [91] CHEN D, TANG J L, XI H X, et al. Image Recognition of Modern Agricultural Fruit Maturity Based on Internet of Things[J]. Traitement Du Signal, 2021, 38(4): 1237-1244.