

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60168

基于机器视觉算法和智能摄像机的柑橘类水果智能分拣系统设计

李 磊¹ 高艳玲² 侯雅坤³ 刘子会⁴

(1. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041; 2. 河北轨道交通职业技术学院, 河北 石家庄 050051; 3. 河北农业大学, 河北 保定 071001; 4. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北 石家庄 050031)

摘要: [目的] 为实现柑橘类水果的自动分拣, 设计一种结合机器视觉算法和智能摄像机的智能分拣系统。 [方法] 该系统由检测室、智能摄像机、反射镜、照明系统及滚筒 (包括传送带) 等构成; 智能摄像机内置微处理器, 无需专门计算机即可捕获和处理图像; 照明系统将 LED 灯带设计在水果上方, 在频闪模式下与摄像机同步工作, 为整个场景提供均匀和稳定的照明。对捕获后的水果图像, 采用机器视觉算法实现图像分割和图像标记, 完成水果大小估算、圆检测、颜色指数估计和局部缺陷识别。 [结果] 以某果园的橙子为试验对象的数据集验证结果表明, 该智能分拣系统对水果大小和颜色指数预测有较高的准确性。 [结论] 所设计的在线智能分拣系统可高效完成柑橘类水果分拣检测, 相比于基于树莓派平台的自动化分级系统和基于机器视觉与光谱融合的品质无损检测分级系统等其他先进的计算机视觉算法在水果局部缺陷分类方面有更高的正确率。

关键词: 柑橘类水果; 自动分拣; 机器视觉算法; 嵌入式微处理器; 颜色指数; 混淆矩阵; 正确分类

Automatic sorting system for citrus fruits based on machine vision algorithms and intelligent camera

LI Lei¹ GAO Yanling² HOU Yakun³ LIU Zihui⁴

(1. Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050041, China; 2. Hebei Vocational College of Rail Transportation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China; 3. Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 4. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: [Objective] To achieve the automatic sorting of citrus fruits. A smart sorting system combining machine vision algorithms and an intelligent camera is designed. [Methods] The system is composed of a detection room, an intelligent camera, a mirror, a lighting system and rollers (including conveyor belts). The intelligent camera is equipped with a microprocessor, which can capture and process images without a dedicated computer. The lighting system consists of LED light strips positioned above the fruits, operating in stroboscopic mode synchronized with the camera to ensure uniform and stable illumination. For the captured fruit images, machine vision algorithms are applied to perform image segmentation and image labeling, achieving fruit size estimation, circle detection, color index estimation and local defect recognition. [Results] Experimental results based on a dataset of oranges collected from a certain orchard demonstrate that the proposed system achieves high prediction accuracy in fruit size and color index estimation. [Conclusion] The designed online smart sorting system can efficiently complete the sorting and detection of citrus fruits. Compared with other advanced computer vision algorithms,

基金项目: 河北省高等学校科学研究项目 (编号: ZC2026290); 河北省教育科学“十四五”规划课题 (编号: 2403194); 河北省人力资源和社会保障科研合作课题 (编号: JRSZH-2025-02204)

通信作者: 高艳玲 (1977—), 女, 河北轨道交通职业技术学院副教授, 硕士。E-mail: sweetwml@sina.com

收稿日期: 2025-11-12 **改回日期:** 2026-01-29

引用格式: 李磊, 高艳玲, 侯雅坤, 等. 基于机器视觉算法和智能摄像机的柑橘类水果智能分拣系统设计[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 71-77.

Citation: LI Lei, GAO Yanling, HOU Yakun, et al. Automatic sorting system for citrus fruits based on machine vision algorithms and intelligent camera[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 71-77.

including automated grading systems based on the Raspberry Pi platform and nondestructive quality detection systems integrating machine vision and spectroscopy, the proposed system achieves higher accuracy in local defect classification.

Keywords: citrus fruit; automatic sorting; machine vision algorithm; embedded microprocessor; color index; confusion matrix; correct classification

在水果收获过程中,一般需要将水果进行分拣。学者^[1-7]广泛研究了水果分拣的机械化和自动化。随着计算机视觉技术的发展,对水果进行自动分拣和分级的高性能检测系统得以实现。自动分拣系统可以对水果分级作业进行更有效的管理,将不符合规格或劣质水果从大量水果中分离出来,帮助种植户在分拣、分级和贮运等方面节省大量成本。这个分拣过程对于柑橘类水果尤为重要,尤其是在收获季节开始时,柑橘类水果虽然已经达到成熟的最佳阶段,但仍可能呈现着不同的外观颜色。

计算机视觉系统技术已被应用于水果和蔬菜的自动质量检测^[8-10]。然而,在受控条件下的室内包装厂分拣生产线上应用的计算机视觉系统存在很大差异。Guo 等^[11]设计了一种用于草莓分离和基于颜色信息分级的机械臂,但所有试验都是在选定的水果样本和实验室受控条件下进行的,很难应用于实际作业。杨鹏仙等^[12]设计了一种水果自动分级系统,该系统以工控机为核心,利用工业相机进行图像采集,通过 LabVIEW 和 LabVIEW Vision Assistant 软件对采集到的图像信息进行处理。但这种系统过于简单,精度较低。李彬等^[13]设计并实现了一种小型的嵌入式苹果分级系统,该系统通过单阈值分割和 Canny 算子完成图像分割和图像边缘提取,利用机器学习领域的 BP 神经网络算法实现分级。但算法复杂,实时性差。文韬等^[14]基于双锥滚子式果杯传输线,设计了一种柑橘综合品质无损检测分级系统,利用单相机拍摄不断翻滚的柑橘视频来获取不同姿态的柑橘图像并进行轮廓提取,采用单个柑橘所有帧图像的最小外接圆直径的平均值来计算果径,以每帧图像得到的二维黄色占比的平均值作为全表面着色率。但该系统过于复杂,而且提取的水果特征很少。刘文博^[15]设计了一种采用 PLC 自动化生产线的物件识别与分拣系统,利用 K-最近邻算法分类器对水果进行识别分类。但该系统仅能分拣不同类型的水果,不能实现同一水果的自动质量检测。

研究拟以橙子为例来设计一种柑橘类水果自动分拣系统。利用嵌入在智能摄像机内高度优化的图像处理算法对不同大小、颜色和局部缺陷的水果进行自动分拣,提高分拣效果,同时降低分拣成本。

1 水果自动分拣系统的设计

设计的柑橘类水果自动分拣系统各组件布局示意图如图 1 所示。整个系统由不锈钢罩检测室、智能摄像机、反射镜、照明系统和滚筒(包括传送带)等构成。

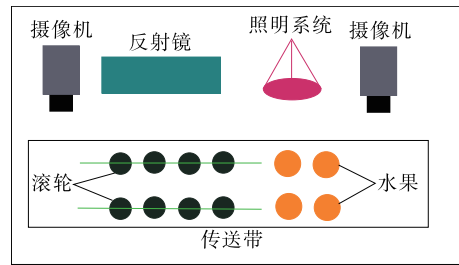
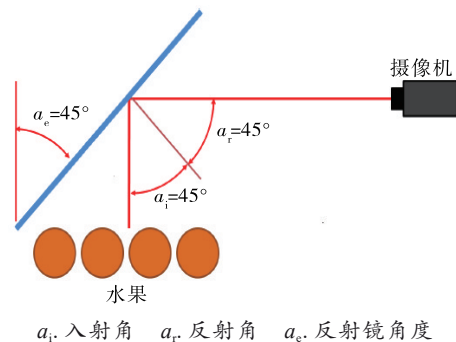


图 1 检测室内机器视觉系统组件的布局

Figure 1 Arrangement of machine vision system components in detection chamber

1.1 检测室

在用于水果分拣的视觉系统的传统设计^[16-17]中,摄像机通常位于传送带上方,导致检测室很高,不利于安装和维护。如果采用广角镜头,又会导致成本过高等问题。因此,将摄像机水平安装,利用反射镜将光路弯曲 45°,从而降低摄像机的高度,如图 2 所示。检测室可由不锈钢罩构成,为了避免检测室内温度过高的问题,在检测室内设计 2 个用于抽排热空气的风扇。



a_i . 入射角 a_r . 反射角 a_e . 反射镜角度

图 2 摄像机布置与反射镜相对于场景平面成 45° 角

Figure 2 Camera arrangement with mirror positioned at 45° relative to scene plane

1.2 图像捕获及处理系统

水果用滚筒传送。每个水果在 2 个滚轮之间移动,当它在摄像机的视场下通过时,滚轮会旋转。将微处理器嵌入具有图像处理能力的智能摄像机中作为图像捕获系统,不仅可以不采用专门的计算机来捕获和处理图像,而且可以直接采用 12 V 直流电源供电。

智能摄像机选择日本索尼公司的 XCI-SX100C/XP 型彩色逐行扫描相机,能够获取分辨率为 1 280 像素 ×

969 像素的 RGB(红绿蓝)格式的图像。除了获取图像外,摄像机本身也能够通过内置的微处理器(VIA Eden ULV 1 GHz)来分析图像,微处理器运行 Windows XP 嵌入式操作系统。该摄像机还具有数字输入和输出、激活照明系统、读取编码器脉冲以及激活外部触发器或与移动平台的控制交互等功能。采用 8 mm 镜头拍摄图像,分辨率为 0.31 mm/像素。当摄像机接收到与传送带移动同步的脉冲编码器外部触发信号时,开始捕获图像。

为了扫描水果的最大表面,必须要捕捉和分析水果的多张图像(每个水果拍摄 4 张照片),水果以 400 mm/s 的速度在摄像机视场中的滚轮上滚动。将场景划分为 4 个区域来捕获水果图像。当水果在摄像机下移动时,它们会旋转运动通过这 4 个位置中的每一个,从而使表面的不同部分在每张图像中由摄像机拍摄。这些位置如 K 所示。当一批新的水果进入视场(前一批水果离开视场)时拍摄 1 张图像,每张图像中每行有 4 个水果。快门时间设置为 1/500 s (2 ms),因为在工作速度下,每个水果在此捕获间隔内仅移动 0.8 mm。整个机器视觉系统设计如图 4 所示。

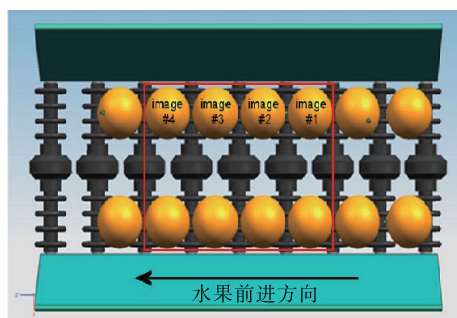


图 3 用红色框标出的摄像机捕捉到的场景

Figure 3 Scene captured by camera marked with red box

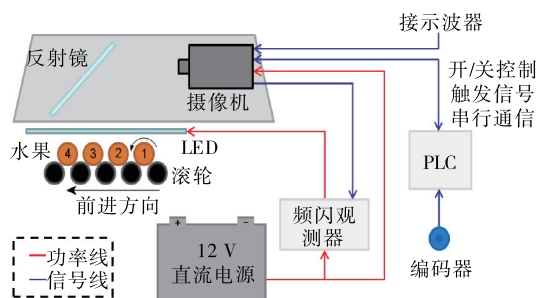


图 4 整个机器视觉系统的原理示意图

Figure 4 Principle of entire machine vision system

分拣柑橘类水果的机器视觉算法包括图像采集、图像分割和标记、水果大小估计、圆检测、颜色指数估计和局部缺陷检测。

1.2.1 图像采集 摄像机需要 40 ms 来获取图像,可以在处理前一个图像的同时获取另一个图像,因此在整个过

程中总共可节省 40 ms。这种技术称为双缓冲,它包括采用 2 个内存缓冲区交替进行图像采集、存储和处理。在接收到新的触发脉冲后,在对图像 A 进行处理的同时,获取图像 B 并将其存储在存储器缓冲区中,直至对图像 A 的处理完成,这时,图像 B 被处理,同时系统等待下一个触发信号开始新的采集。

1.2.2 图像分割和标记 由于实现性能的要求,整个图像分析只能在一个图像循环中执行。在此基础上,执行的分割方法也在同一个步骤中提取所有的目标特征。摄像机提供 RGB 格式的图像^[18-19]。为了分割图像,提出一种全局阈值化方法。阈值基于色度坐标 r 和 g ,二者的值可由式(1)和式(2)求得。

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \tag{1}$$

$$g = \frac{G}{R + G + B}, \tag{2}$$

式中:

r, g ——色度图二维坐标系中的色度坐标;
 R, G, B ——红、绿、蓝颜色像素值。

为了确定阈值 T ,采用自动阈值选择方法。阈值 T 计算:

$$T = \mu_r + c\sigma_r, \tag{3}$$

式中:

T ——阈值;
 μ_r ——图像的 r 平均值;
 σ_r ——图像的 r 标准偏差;
 c ——常数,取值 1~3。

提取图像中重要的颜色信息后,采用标记算法在二值图像^[20]中分离对应于实际水果的像素区域。标记算法在图像中搜索相互连接并定义为区域的像素。

1.2.3 水果大小估计 采用水果的轮廓来估计水果的大小,需要提取和分析水果的周长、计算质心来搜索最大或平均直径,为了优化估计水果大小的性能,通过面积测量间接估计水果的大小。分割图像时,将分割区域计算为属于该水果的所有像素之和,利用式(4)计算直径。

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}, \tag{4}$$

式中:

d ——水果的估计直径,mm;
 A ——获得的面积,mm²。

由于柑橘类水果近似球形,其大小可以同一水果获得的每个图像的大小的平均值表示。

1.2.4 圆检测 采用圆检测对果实进行聚类定位。圆心坐标和圆的半径采用预先确定的像素数(如 100 像素)的滑动段进行计算。将滑动段的像素坐标作为输入,根据式(5)计算圆参数。

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r_c^2, \quad (5)$$

式中:

(x, y) ——圆的点坐标;

(x_c, y_c) ——圆心坐标;

r_c ——圆的半径, mm。

令 $\alpha = x_c^2 + y_c^2 - r_c^2$, 则式(5)可变形为:

$$2xx_c + 2yy_c - \alpha = x^2 + y^2. \quad (6)$$

或者用矩阵形式可表示为:

$$\begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & -1 \\ 2y_1 & 2y_2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 2x_n & 2y_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ -\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \dots \\ \dots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:

(x_i, y_i) ——可能的候选圆 i 上的点坐标, $i=1, 2, \dots, n$ 。

采用式(7)估计滑动段的圆参数、圆心坐标和半径。这些圆坐标被视为可能的候选圆,并根据接近性分组在一起。如果中心组中的像素数大于预设的数字,则该组被标记为可能的水果中心。水果中心采用加权平均值从中心组计算出来。

1.2.5 颜色指数估计 在收获早季柑橘时,虽然它们已经达到了一个可接受的感官成熟阶段,但其外部颜色仍然要从绿色变为橙色。此时,可利用乙烯处理来加速典型橙色的形成。为了对颜色进行分级,采用柑橘颜色指数(citrus colour index, CCI),并根据分光光度计获得的色差值 L, a, b (Hunter Lab) 参照文献[21]计算。

图5给出了具有不同 CCI 值的橙子及其外观。



CCI ≤ -20 -20 < CCI ≤ -10 -10 < CCI ≤ 0 0 < CCI ≤ 10 CCI > 10

图5 不同 CCI 值的橙子及其外观

Figure 5 Oranges with different CCI values and their appearance

在机器视觉系统中,图像颜色值以 RGB 坐标给出,因此要将它们转换为 Hunter Lab 颜色空间来估计颜色指数。系统中采用的 LED 色温为 6 000 K,因此采用 D65 (6 500 K)光源和 Hunter Lab 给出的 10°观察器进行转换。即通过图像分割过程,分别计算 4 个图像的平均 RGB 值。分割后,将平均 RGB 值转换为 Hunter Lab 坐标。因此,图像的 CCI 可以视为从水果的 4 个图像中获得的平均 CCI。

1.2.6 局部缺陷检测 从表面无缺陷的部分中分割缺陷区域,可能导致色彩空间中不规则的缺陷聚类。此外,在某些情况下,来自同一橙子的像素之间的局部颜色变化

并不足以对缺陷进行分类。这种缺陷类型的多样性会妨碍采用局部结构或纹理特征从清晰表面区域分割缺陷。因此,利用应用于图像区域的掩模来构建一个简单且有效的缺陷检测器。检测器采用 5 个空间频率算子 M_k ($k=1, 2, \dots, 5$), 它将每个柑橘图像划分为典型缺陷尺寸 $N \times N$ 的正方形区域,并将 5 个算子应用于这些正方形区域的红色和绿色平面。每个空间频率算子 M_k 是一个 $N \times N$ 矩阵,其元素为整数 1, 0 或 -1。前 4 个矩阵的元素 m_{ij}^k 定义如下:

$$m_{ij}^1 = \begin{cases} 1 & i < N/2 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \quad (8)$$

$$m_{ij}^2 = \begin{cases} 1 & j < N/2 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \quad (9)$$

$$m_{ij}^3 = \begin{cases} 1 & i > j \\ 0 & i = j \\ -1 & \text{其他} \end{cases}, \quad (10)$$

$$m_{ij}^4 = \begin{cases} 1 & i < (N - j) \\ 0 & i = (N - j) \\ -1 & \text{其他} \end{cases}. \quad (11)$$

为了确定第 5 个矩阵 M_5 的元素,定义一个方阵,其大小和元素的构造方式与其余 M_k 相同,只是 $N' = N/2$ 。 M_5 定义为:

$$M_5 = \begin{bmatrix} -m_{ij}^4 & -m_{ij}^3 \\ m_{ij}^3 & m_{ij}^4 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

通过应用空间频率算子,把图像分成若干个区域,每个区域的大小为 $N \times N$,令 $x_{ij}^{r,g}$ 为一个区域中像素的红色和绿色成分,分别对红色和绿色成分 $I_k^{r,g}$ 应用 5 个掩模来计算:

$$I_k^{r,g} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}^{r,g} m_{ij}^k. \quad (13)$$

1.3 照明系统设计

光照是机器视觉中重要的要素之一,在整个场景中提供均匀和稳定的照明非常重要,可以避免阴影和亮点。对此,将 LED 灯带置于水果上方。灯带长 600 mm,共有 50 个 LED,光照强度为 20 lm/cm,足以满足应用。由于频闪信号需要与摄像机同步,并与图像捕获一起触发,为此,采用基于微控制器的电路板。橙子表面的亮点可能导致错误的颜色测量,为了解决这个问题,在 LED 和摄像机镜头前方放置偏振滤光片。

2 试验结果

从当地某果园收获的水果中随机挑选涵盖不同大小和颜色橙子来评价自动分拣系统的预测和分类能力。

在线分拣过程的处理速度是传送带上每秒运送 8 个橙子,橙子以 400 mm/s 的速度在滚轮上滚动通过摄像机视场。总共测试 20 个图像,每个图像包含 8 种不同颜色和大小橙子。采用连接到摄像机的数字输出示波器

(FNIRSI2C53P 双通道平板数字示波器)显示测量值,在开始和完成时向示波器发送信号,从而体现分拣系统的可视性。

2.1 大小评估

数字卡尺测量橙子赤道直径的平均值。将手工测量与自动分拣系统检测到的数据进行比较,采用 R^2 系数(即相关系数的平方)来量化线性关系。将水果分为3个尺寸类别:

- 第1类:直径 ≤ 65 mm。
- 第2类: 65 mm < 直径 ≤ 80 mm。
- 第3类:直径 > 80 mm。

将手工测量的大小与自动分拣系统估计的大小进行比较来建立线性回归模型。获得的线性模型的相关系数 R^2 为0.990,调整后的 R^2 为0.992,相关系数具有统计学显著特征,标准误差 < 1 mm。图6为调整后的线性模型。

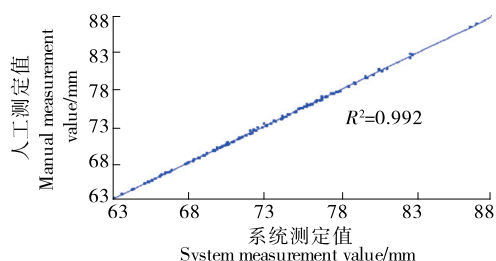


图6 人工测定值与系统测定值得到的橙子大小的线性模型

Figure 6 Linear model of orange size obtained from manual measurement values and system measurement values

利用1.2.3中的水果大小估计方法对水果进行分类时,对于3个尺寸类别都获得了100%的成功(见表1),且标准误差在1 mm以下。说明建立的线性回归模型是有效的。

表1 采用机器视觉系统实现水果按大小分类的混淆矩阵

类别	第1类	第2类	第3类
第1类	100	0	0
第2类	0	100	0
第3类	0	0	100

2.2 颜色评估

为了评价自动分拣系统在颜色估计方面的性能,采用C400型分光光度计(柯尼卡美能达光电公司)手动测量每个水果,随机选取6个点。3个操作员测量4个位置

的颜色,共计12个测量值,然后取测得的平均值。为了评价机器视觉系统对颜色的预测能力,计算分光光度计测量值与机器视觉系统测量值之间的相关性。与大小估计一样,将水果分为3类颜色:

- 第1类: $CCI \leq 3$ 。
- 第2类: $3 < CCI \leq 7$ 。
- 第3类: $CCI > 7$ 。

用分光光度计测得的水果平均CCI值与采用自动图像分析系统计算的具有相关性,执行二次回归分析,获得模型的相关系数 R^2 为0.940,调整后的 R^2 为0.928。图7为得到的CCI线性模型。二次模型相关性可以用2种CCI值之间的实际差值来解释。CCI值为3~7的橙子中发现了更大的颜色不一致性,颜色从绿色变为橙色。较低的CCI值对应绿色橙子,较高的CCI值则对应均匀橙色的橙子。因此,CCI值在3~7之外的水果之间的差异在感官上更低。

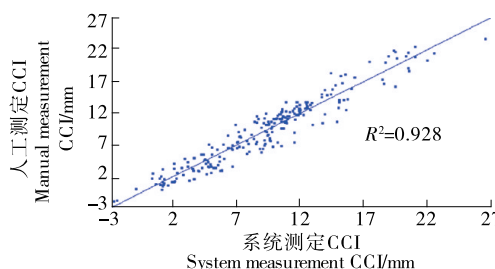


图7 分光光度计测量值与系统测定值得到的CCI回归模型

Figure 7 CCI regression model obtained from spectrophotometer measurement values and system measurement values

表2为自动图像分析系统得到的混淆矩阵。可以看到,结果最好的是第3类。相比之下,第1类呈现均匀的浅绿色,有时接近第2类的阈值,第2类主要包括绿色和一些黄色区域的水果。说明系统对于成熟橙子的颜色估计更准确,因为成熟橙子的颜色指数通常 > 7 。

2.3 局部缺陷检测及比较

利用机器视觉分析系统1.2.6中的局部缺陷检测方法,对另一组橙子进行图像分析,获得橙子的表面局部缺

表2 采用机器视觉系统实现水果按颜色分类的混淆矩阵

类别	第1类	第2类	第3类
第1类	86.0	16.0	0
第2类	0	90.7	9.3
第3类	0	1.9	98.1

陷,并与文献[12]的基于计算机视觉的水果自动分级系统、文献[13]的基于树莓派平台的自动化分级系统和文献[14]的基于机器视觉与光谱融合的品质无损检测分级系统得到的结果进行比较。局部缺陷包括风疤痕(A)、茎端断裂或老化(B)、煤烟霉(C)、炭疽病(D)、油斑病(E)、蓟马疤(F)6种类型。每种缺陷类型的橙子各30个,每个橙子在4个不同位置进行图像采集,因此每种缺陷类型的橙子获得120张图像,6种类型缺陷的橙子总共获得720张图像。同时,采用人工对橙子缺陷类型进行分类,以便评价自动分拣系统的性能。为此,创建3个不同的特征向量:FV1(均值、范围)、FV2(方差、偏度、峰度系数)、

FV3(均值、范围、方差、偏度、峰度系数)。3个特征向量按照统计顺序选取。FV1由一阶统计量构成,仅提供分割区域有关颜色含量的基本信息;FV2包含更高阶的统计信息,如与缺陷区域的纹理相关的信息等;FV3包含所有特征,如颜色、大小、圆度和纹理等。

不同的机器视觉算法得到的结果见表3。结果表明,采用更多的特征会提高算法的性能。然而,对于所有局部缺陷和特征向量来说,研究构建的机器视觉自动图像分析系统的性能是最优的,这得益于该系统更加合理的图像捕捉技术,及其提取的能充分表征完整水果外观特征的大小、圆度和颜色指数。

表3 不同算法采用RGB颜色成分分类的总体正确率

Table 3 Overall accuracy of classification using RGB color components by different algorithms %

缺陷类型	研究构建的系统			文献[12]			文献[13]			文献[14]		
	FV1	FV2	FV3	FV1	FV2	FV3	FV1	FV2	FV3	FV1	FV2	FV3
A	96.1	97.3	98.8	88.4	89.0	90.3	90.7	91.9	93.0	94.2	95.6	97.0
B	94.0	95.1	96.6	80.0	81.2	83.5	87.3	88.8	90.1	92.1	93.3	95.1
C	97.0	98.2	99.3	89.3	90.6	91.9	93.3	94.9	95.8	95.5	96.7	98.0
D	95.7	96.8	97.8	87.3	88.2	90.0	90.9	92.1	93.4	92.9	93.6	94.4
E	97.1	98.4	99.5	88.9	90.3	91.6	93.7	94.9	95.6	95.2	96.7	98.3
F	96.7	97.7	98.5	88.2	89.1	90.2	90.9	92.0	93.3	94.3	95.4	97.1

3 结论

该研究提出了一种基于实时机器视觉算法与智能摄像机的自动水果分拣系统。该系统依托智能摄像机内置的高度优化图像处理算法,可对传送带上每秒8个、不同大小、颜色差异及局部缺陷的水果实时分拣,取得了良好的效果。同时,系统采用频闪技术的LED功耗低,散热少;采用智能摄像机简化了计算机视觉的应用,节约了成本;单张图像最大处理时间仅为125 ms。通过获取和分析单果4个不同视角图像,就可对水果进行在线自动分拣。

当然,研究构建的自动分拣系统也存在一定的局限性和不足。①在分拣水果品种方面,如对于某些较大和颜色区域多样化的水果如苹果、圆度较小的水果如芒果、柠檬和桃等非球形类水果,分拣系统的准确性会降低。②设计的机器视觉算法在处理水果特征时会对良品和瑕疵品都采用相同的完整过程,这降低了算法效率。如果能够采用分级判决和分离装置,会大大提高分拣效果和效率。③如果面粗糙度不同或存在污染,可能导致不同的反光效果,而且光源不稳定造成光照变化等,也会影响视觉算法的性能。这些都是未来研究要重点考虑的方面,需要从分拣系统硬件设计和机器视觉算法等方面加以改进和提高。

参考文献

[1] 王瑞雪, 朱立成, 赵博, 等. 农业机器人技术现状及典型应用[J]. 农业工程, 2022, 12(4): 5-11.
WANG R X, ZHU L C, ZHAO B, et al. Current situation and typical application of agricultural robot technology[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(4): 5-11.

[2] 牛润新, 张向阳, 王杰, 等. 基于激光雷达的农业机器人果园树干检测算法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 21-27.
NIU R X, ZHANG X Y, WANG J, et al. Orchard trunk detection algorithm for agricultural robot based on laser radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 21-27.

[3] 刘生寿, 张海翔, 李凯, 等. 双动力智能农业巡检机器人关键技术研究[J]. 江西农业, 2025(12): 37-39.
LIU S S, ZHANG H X, LI K, et al. Research on key technologies of dual-power intelligent agricultural inspection robot[J]. Jiangxi Agriculture, 2025(12): 37-39.

[4] 王剑文. 机器人在果园精准农业中的应用及发展前景[J]. 农业工程技术, 2023, 43(32): 12-13.
WANG J W. The Application and development prospects of robots in precision agriculture in orchards[J]. Applied Engineering Technology, 2023, 43(32): 12-13.

[5] 苟园晏, 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 W, 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.
- [6] 胡仕林, 陈伟, 张境锋, 等. 基于改进YOLO v5的苹果采摘机器人目标检测方法[J]. *农机化研究*, 2024, 46(6): 48-55.
HU S L, CHEN W, ZHANG J F, et al. Target detection method of apple harvesting robot based on improved YOLO v5[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(6): 48-55.
- [7] 鲍秀兰, 马志涛, 马萧杰, 等. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 124-135.
BAO X L, MA Z T, MA X J, et al. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 124-135.
- [8] 杨昆程, 孙梅, 陈兴海. 水果成熟度的高光谱成像无损检测研究[J]. *食品科学技术学报*, 2015, 33(4): 63-67.
YANG K C, SUN M, CHEN X H. Nondestructive inspect of fruit maturity with hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 33(4): 63-67.
- [9] 赵丹丹, 艾医. 基于计算机视觉的苹果大小检测方法研究[J]. *农机化研究*, 2022, 44(7): 206-209, 214.
ZHAO D D, AI Y. Research on apple size detection method based on computer vision[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(7): 206-209, 214.
- [10] 纪莹莹. 基于计算机视觉的西红柿品质分级技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021: 23-29.
JI Y Y. Research on tomato quality grading technology based on computer vision[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021: 23-29.
- [11] GUO F, CAO Q X, MASATERU N. Fruit detachment and classification method for strawberry harvesting robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2008, 5(1): 41-48.
- [12] 杨鹏仙, 王惠玲, 宗强, 等. 基于计算机视觉的水果自动分级系统的设计[J]. *石河子科技*, 2022(3): 16-17.
YANG P X, WANG H L, ZONG Q, et al. The design of an automatic fruit grading system based on computer vision[J]. *Shihezi Science and Technology*, 2022(3): 16-17.
- [13] 李彬, 胡步发, 刘顾胜. 基于树莓派平台的苹果自动化分级系统实现[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(4): 209-211.
LI B, HU B F, LIU G S. Implementation of apple automatic grading system based on raspberry pi platform[J]. *Machine Building & Automation*, 2020, 49(4): 209-211.
- [14] 文韬, 代兴勇, 李浪, 等. 基于机器视觉与光谱融合的柑橘品质无损检测分级系统设计与试验[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(1): 38-45.
WEN T, DAI X Y, LI L, et al. Design and experiment of non-destructive testing and grading system for citrus quality based on machine vision and spectral fusion[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2024, 45(1): 38-45.
- [15] 刘文博. 基于视觉信息的自动化物品分类与分拣系统设计[J]. *信息系统工程*, 2024(6): 26-29.
LIU W B. Design of an automated item classification and sorting system based on visual information[J]. *China CIO News*, 2024(6): 26-29.
- [16] 丁艳华, 马海乐, 曲文娟, 等. 基于可编程逻辑控制器的超声阵列辅助酶解控制系统设计与试验[J]. *食品与机械*, 2021, 37(3): 76-80.
DING Y H, MA H L, QU W J, et al. Design and experiment of ultrasound-array-assisted enzymatic hydrolysis control system based on PLC[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 76-80.
- [17] 田师一, 姜国新, 毛岳忠, 等. 食品智能感知技术的发展与前沿探索[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(6): 1-11.
TIAN S Y, JIANG G X, MAO Y Z, et al. Development and frontier exploration of food intelligent perception technology [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(6): 1-11.
- [18] 吴爽, 李国建, 介邓飞. 基于深度学习的西瓜可见/近红外光谱可溶性固形物预测模型研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 132-135.
WU S, LI G J, JIE D F. Prediction model research of SSC in watermelon based on deep learning and visible/near infrared spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 132-135.
- [19] 刘佳浩, 高军伟, 张炳星, 等. 基于机器视觉的水果分级系统[J]. *食品与机械*, 2023, 39(6): 112-118.
LIU J H, GAO J W, ZHANG B X, et al. Design of fruit grading system based on machine vision[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(6): 112-118.
- [20] 高升. 基于近红外相机成像的红提串缺陷检测[J]. *食品与机械*, 2023, 39(1): 146-151.
GAO S. Defect detection method of red globe grapes bunches based on near infrared camera imaging[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(1): 146-151.
- [21] LU Y T, LI D, LI L, et al. Effects of elevated CO₂ on pigment metabolism of postharvest mandarin fruit for degreening[J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126462.