

基于光谱图像融合技术的蓝莓品质 在线评价系统设计与应用

荀拾虎¹ 咸嘉玮¹ 王微娜¹ 石林英¹ 陈秋汐² 范伟¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 云南省澄江市乡村振兴发展中心, 云南 玉溪 653100)

摘要: [目的] 实现蓝莓品质的精准无损检测及分选。[方法] 设计了一种基于近红外光谱与可见光图像融合的蓝莓品质在线评价系统。该系统由果盒链式输送模块、线阵式图像检测模块、近红外光谱检测模块及控制系统组成。采用近红外光谱检测模块设计了漫反射式光路, 通过 S-G 卷积平滑与二阶导数联用预处理, 结合连续投影算法 (SPA) 提取特征变量, 建立偏最小二乘回归 (PLSR) 模型预测蓝莓可溶性固形物含量。[结果] 蓝莓个体果径的判别相对误差平均值为 0.093, 果径均匀度判别准确率达 91.85%。蓝莓优等品、一等品和二等品的预测相关系数分别为 0.843 4, 0.782 2, 0.723 7, 预测均方根误差分别为 0.831 6, 0.951 0, 1.070 5。[结论] 综合蓝莓外部及内部品质的决策树品质评价模型综合评价准确率达 89.55%。
关键词: 蓝莓; 近红外光谱; 可见光图像; 品质评价; 无损检测

Design and application of an online evaluation system for blueberry quality based on spectral image fusion technology

XUN Shihu¹ XIAN Jiawei¹ WANG Weina¹ SHI Linying¹ CHEN Qiuxi² FAN Wei¹

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2. Center for Rural Revitalization Development of Chengjiang City, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: [Objective] To achieve precise non-destructive detection and sorting of blueberry quality. [Methods] An online evaluation system for blueberry quality based on near-infrared spectroscopy and visible light image fusion is designed. The system consists of a fruit box chain conveyor module, a linear array image detection module, a near-infrared spectroscopy detection module, and a control system. A diffuse reflection optical path is designed by the near-infrared spectroscopy detection module, and a partial least squares regression model is established to predict the soluble solids content in blueberries through S-G convolution smoothing, second-order derivative connection preprocessing, and sequential projection algorithm for feature variable extraction. [Results] The developed system shows an average relative error of 0.093 in determining the individual diameter of blueberries and the accuracy of 91.85% in measuring fruit diameter uniformity. The predicted correlation coefficients for superior, first-class, and second-class blueberries are 0.843 4, 0.782 2, and 0.723 7, respectively, with predicted root mean square errors of 0.831 6, 0.951 0, and 1.070 5, respectively. [Conclusion] The overall evaluation accuracy of the decision tree quality evaluation model for blueberries, integrating both external and internal quality, reaches 89.55%.

Keywords: blueberry; near-infrared spectroscopy; visible images; quality evaluation; non-destructive detection

蓝莓作为杜鹃花科越橘属植物, 以其显著的保健功效、丰富的营养成分以及独特的风味而备受关注, 被誉为“浆果之王”^[1]。其果实不仅富含花青素、维生素 C、可溶

性糖等营养成分, 还具有抗衰老、明目、强心、抗癌等多种生理功能^[2]。蓝莓果实品质是影响其市场竞争力的关键因素之一^[3-4]。蓝莓的外观品质 (如果径、色泽)^[5] 和内在

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 32360579)

通信作者: 范伟 (1983—), 男, 湖南农业大学讲师, 博士。E-mail: weifan@hunau.edu.cn

收稿日期: 2025-02-27 改回日期: 2025-08-08

引用格式: 荀拾虎, 咸嘉玮, 王微娜, 等. 基于光谱图像融合技术的蓝莓品质在线评价系统设计与应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 82-90.

Citation: XUN Shihu, XIAN Jiawei, WANG Weina, et al. Design and application of an online evaluation system for blueberry quality based on spectral image fusion technology[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 82-90.

品质(如糖度、酸度)^[6]的波动不仅会降低消费者的购买意愿,还会对蓝莓的分级、包装和加工产生不利影响^[7-10],因此亟需一种蓝莓内外品质无损精准检测系统。

目前,水果品质检测技术主要分为两类:①基于机器视觉的外观检测方法,如向阳等^[11]提出了一种基于迁移学习的芒果双面成熟度在线检测分级系统,通过上、下层输送带将芒果运输到图像采集区域,分别获取正、反面图像对芒果成熟度分级平均准确率达到96.72%。②基于光谱的内部指标预测,廖志强等^[12]采用近红外光谱技术与机器学习算法构建了苹果含糖量的预测模型,其分级精度可达0.9084。文静等^[13]概述了高光谱检测技术在葡萄浆果外形测量、化学物质检测、成熟度判别以及缺陷损伤认定等方面的研究进展。但仍然缺乏一种高效率、低成本、可同时检测蓝莓内外品质的方法。

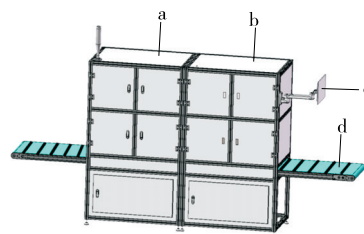
蓝莓为小型浆果,单颗果实进行检测,检测精度虽高,但无法满足生产所需的高效率要求。研究拟根据蓝莓采收后,分装成盒入库质量评价的实际应用环节,采用常规125 g/盒的市售标准,以盒装蓝莓为试验对象,研究拟将机器视觉技术与近红外光谱技术进行融合,设计一台蓝莓品质在线无损评价设备,使其不仅能实现外部品质(表面缺陷、形状、颜色等)的均匀度检测^[14-15],还能对样品内部品质(糖度、酸度等)^[16]进行预测,旨在解决盒装蓝莓品质均匀度评价问题。

1 蓝莓品质在线评价系统总体设计

1.1 系统整体结构及工作流程

试验设计的蓝莓品质在线评价系统主要由果盒链式输送带、线阵式图像检测模块、近红外光谱检测模块及控

制系统模块组成。其中果盒链式输送带主要由传动电机、果盒定位卡口以及传送皮带组成,控制系统主要有工控机、PLC、IO继电器、色差传感器等。设备结构示意图如图1所示。设备整体长2.0 m,宽0.7 m,高1.5 m。



a. 线阵式图像检测模块 b. 近红外光谱检测模块 c. 工控机(内含控制系统软件) d. 果盒链式输送带

图1 蓝莓品质在线评价系统

Figure 1 Online evaluation system for blueberry quality

蓝莓品质在线评价系统工作流程如图2所示,接入工作电源,启动系统所有模块,将蓝莓样品放置于果盒输送链的果盒内,由输送带带动样品依次进入线阵式图像检测模块、近红外光谱检测模块。当样品经过检测模块时,色差传感器识别样品并触发信号自动采集样品的图像与光谱信息,图像与光谱信息传输至工控机分别计算出果径大小、色泽信息与可溶性固形物含量,系统融合上述指标对蓝莓进行综合等级判别。色差传感器1不触发时,系统不工作;色差传感器1正常触发且色差传感器2小于等于特定时间阈值正常触发,系统正常输出结果,否则返回检修信号。

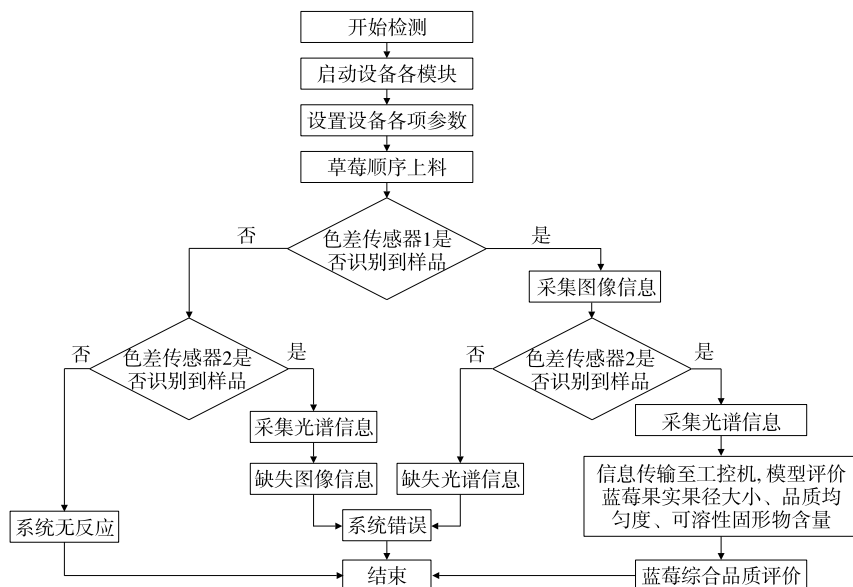
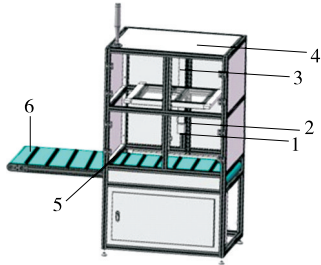


图2 蓝莓品质在线评价系统工作流程图

Figure 2 Workflow diagram of the online evaluation system for blueberry quality

1.2 线阵式图像检测模块

为了快捷稳定获取高质量蓝莓图像信息,实现蓝莓表面信息提取与果径大小检测,采用线阵式工业相机对整盒蓝莓以垂直角度拍摄。线阵式图像检测模块主要包括线阵式传感器、相机镜头、条形光源、步进电机、暗箱 5 个部件(图 3)。为了获取高质量样品图像,在相机两端布置条形光源,并将相机传感器、镜头、光源 3 个部件固定在一个升降台上,由步进电机驱动升降台进行上下调节。1 号色差传感器嵌于图像检测模块左侧,样品经过时,通过 IO 继电器将电信号传递给相机,相机接收到信号后,启动自动拍照模式,自动采集蓝莓图像。



1. 线阵式传感器 2. 相机镜头 3. 步进电机 4. 外壳 5. 1 号色差传感器 6. 果盒链式输送带

图 3 图像检测模块结构示意图
Figure 3 Schematic diagram of the image detection module

线阵式工业相机为该模块的核心部件,试验采用的线阵相机型号为 HT-GEL41C-T,其与被测物体距离和相机的行频、镜头焦距必须匹配,否则会造成成像压缩和拉伸^[17]。按式(1)计算线阵相机行频,获取最优条件。

$$L_{PS} = \frac{V \times f}{H \times 7.02}, \quad (1)$$

式中:

L_{PS} ——线阵相机行频,Hz;

V ——传送带线速度, $\mu\text{m}/\text{s}$;

f ——镜头焦距,mm;

H ——相机镜头到物体的距离,mm;

7.02——相机 CMOS 像元大小, μm 。

1.3 近红外光谱检测模块

蓝莓的可溶性固形物含量为表征其内部品质的重要指标^[18-19]。SSC 值越高,果实风味和口感越佳,与消费者感知的甜度、口感满意度密切相关。采用近红外光谱检测模块建立蓝莓可溶性固形物含量预测模型,基于蓝莓为小型浆果且成盒堆叠的特点,采用大光斑漫反射式光路可以有效获取整盒蓝莓样品的光谱品质信息^[20-21],如图 4 所示。

近红外光谱检测模块以近红外光谱仪为核心。采用在线近红外光谱仪(PATPro-NIR-1.7,上海谱为科技有限

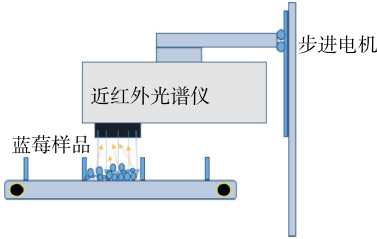
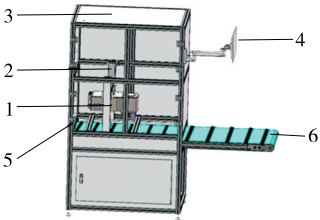


图 4 近红外光谱漫反射光路设计示意图
Figure 4 Schematic diagram of diffuse reflection light path design for near-infrared spectroscopy

公司),20 W 卤钨灯光源,镀金全息固定光栅,阵列钢镓砷检测器。模块构成如图 5 所示。为了消除外界环境因素干扰,提高光谱信噪比^[22],光谱仪设计机械轴带动光栅转动,实现近红外仪器的自检校正,确保光谱采集的稳定性。当蓝莓样品输送到近红外光谱检测模块时,首先被位于近红外检测模块左侧的 2 号色差传感器识别,将信号传递至 IO 继电器,实现近红外光谱的自动采集。此外,为获取高质量光谱,设计的升降台可优化近红外光谱仪采集高度。



1. 近红外光谱仪 2. 步进电机 3. 外壳 4. 工控机 5. 2 号色差传感器 6. 果盒链式输送带

图 5 近红外光谱检测模块
Figure 5 Near-infrared spectroscopy detection module

1.4 系统参数设置

设备接入工作电源,先进行色差传感器校准,打开工控机,设置传送带速度为 2 000 r/min,镜头焦距 35 mm,镜头到样品距离为 700 mm,像元大小 7.02 μm ,由式(1)计算得到行频为 3 490 Hz,近红外光谱参数:积分时间 2 000 μs ,检测器温度 15 $^{\circ}\text{C}$,将蓝莓样品有序放置在传送带工作台上,由传送带带动样品依次进入到线阵式图像采集模块、近红外光谱采集模块。开始自动采集样品的图像光谱信息,每组样品平均采集 3 次。

2 蓝莓品质在线评价控制及数据处理系统设计

2.1 控制系统

控制系统主要由工控机、PLC、IO 继电器以及色差传感器等组成。可实现对蓝莓图像和光谱信息的自动获取以及品质等级评价。传送带颜色设计为白色,与蓝莓有

较大色差^[23],可以避免色差传感器误触发,也有利于蓝莓果径提取分析^[24]。

控制系统采用自主开发的人机交互控制软件,既可以实现对线阵式工业相机和近红外光谱的参数优化,也可以将所采集的数据处理后建立蓝莓品质判别模型,实现蓝莓品质在线实时分析,分析主界面如图6所示。

2.2 蓝莓图像数据处理流程

整盒蓝莓具有个体体积小、数量多、堆叠粘连等特点,引入YOLOv8-seg分割方法对整盒蓝莓进行识别并计算果径及品质均匀度^[25-26]。具体流程为:首先提取整盒蓝莓中单颗果实的分割掩码,掩码是与图像尺寸相同的

二值矩阵,蓝莓像素值为1,背景为0^[27]。进而对每颗蓝莓掩码进行计算,取其最大内切圆直径平均值作为果径的像素值^[28-29]。最后将像素值转换为实际尺寸,获取蓝莓果径^[30]。

使用采集到的盒装蓝莓照片共计1 500张,经过旋转、反转、添加高斯噪声等数据增强后达到10 000张图像,如图7所示。然后进行标注和模型训练,图8为蓝莓个体识别结果,表1为不同等级蓝莓识别结果,整体召回率为0.735,生成掩码召回率为0.782。表明试验模型在蓝莓识别中具有较好的平衡性能,对不同大小和形状的蓝莓均能有效识别并分割。其中对于优等品的蓝莓模型识



图6 蓝莓在线品质评价系统软件输出主界面

Figure 6 Output interface of the online evaluation system for blueberry quality

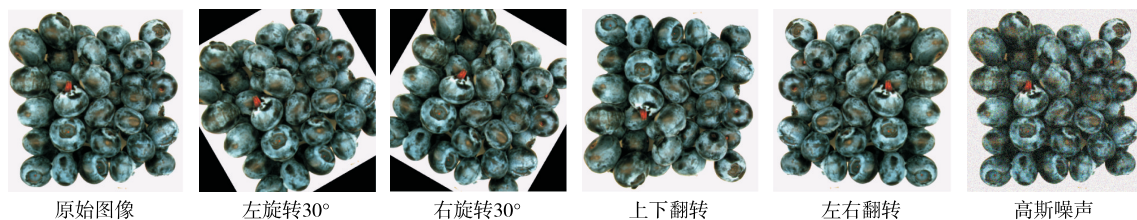
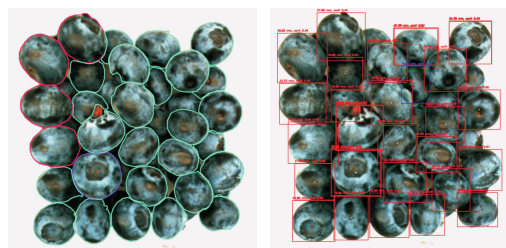


图7 数据增强

Figure 7 Data augmentation



紫色为优等品;红色为一等品;蓝色为二等品

图8 蓝莓个体的识别与果径计算

Figure 8 Recognition of different grades of boxed blueberries and calculation of fruit diameter

别精度较高,能有效识别其特征信息,而一等品蓝莓检测性能表现稳定,相较于优等品和一等品,二等品的检测精度略低,主要是因为二等品蓝莓的外观特征变化较大,容易被遮挡导致无法识别到蓝莓的完整个体。根据模型提取到的蓝莓果实果径像素值与像素比例转换得到蓝莓果实的实际果径大小。

2.3 近红外光谱数据处理流程

近红外光谱模块获取蓝莓在线漫反射光谱来建立分析模型^[31],预测其可溶性固形物含量。蓝莓可溶性固形物含量参考标准方法测定^[32]。预处理后的光谱如图9所

表 1 YOLOv8-Seg 模型性能结果[†]

Table 1 Performance of the YOLOv8-seg model

类别	数量	类别召回率	mAP@50(B)	mAP@50-95(B)	掩膜召回率	mAP@50(M)	mAP@50-95(M)
所有等级	10 000	0.735	0.857	0.597	0.782	0.821	0.543
优等品	4 153	0.851	0.921	0.623	0.752	0.911	0.618
一等品	3 268	0.734	0.870	0.597	0.712	0.806	0.547
二等品	2 564	0.620	0.834	0.571	0.702	0.746	0.464

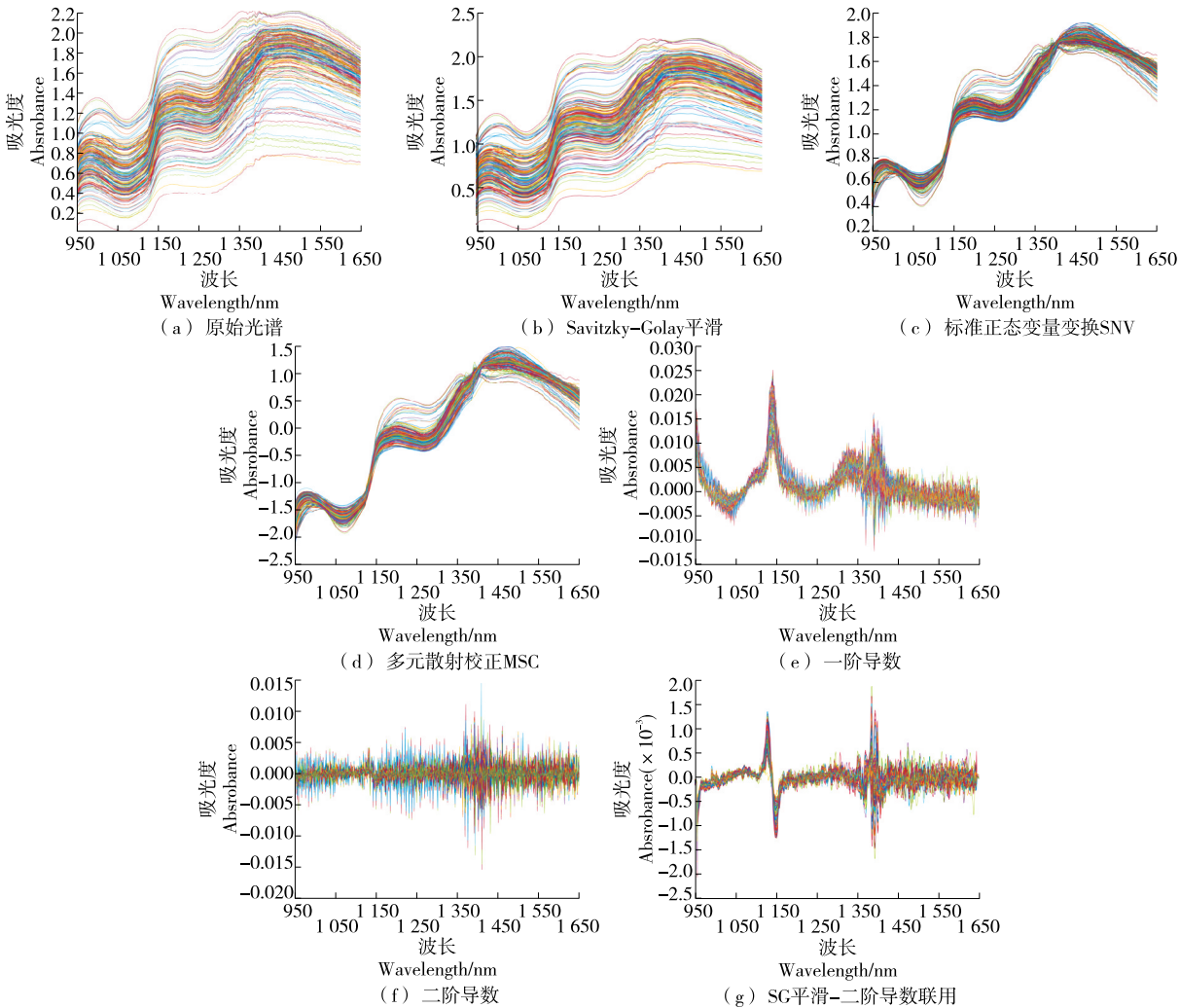


图9 不同预处理方法处理前后的光谱变化情况

Figure 9 Spectral changes before and after treatment by different pretreatment methods

示,分别进行SG卷积平滑(SG平滑)、标准正态变量变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、一阶导数和二阶导数预处理,经过分析对比后选用SG卷积平滑(窗口宽度15点、3阶多项式)与二阶导数联用的预处理方法以提高建模精度,然后采用连续投影算法(SPA)筛选特征变量,筛选结果如图10所示,主要分布为950 nm处筛选出1个波长点,1 406~1 555 nm处筛选出149个波长点,共筛选出150个

特征变量,因该光谱区域覆盖碳水化合物C—H/O—H键的二级倍频与组合频吸收峰,与糖类物质特征振动密切相关^[33]。进而用这些特征变量建立偏最小二乘回归(PLSR)预测模型,结果如图11及表2所示。

根据相关系数 R^2 与均方根误差RMSE对模型的预测能力进行评判,由表2可知,采用SG平滑与二阶导数联用预处理结合特征变量联合建模。蓝莓的可溶性固形物含

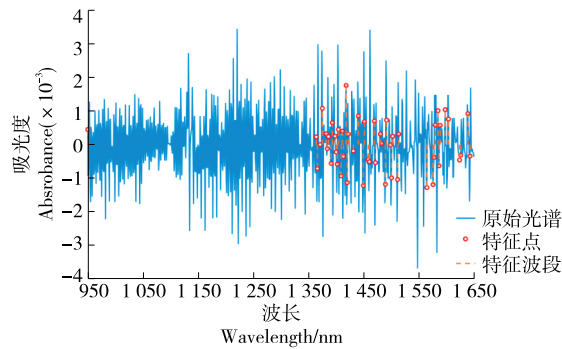


图 10 SPA 特征变量筛选结果

Figure 10 Screening results of SPA characteristic variables

量模型与原始光谱相比预测精度显著提高,但不同等级蓝莓的提升幅度存在明显差异,优等品预处理后训练集 R^2 从 0.453 2 跃升至 0.843 4,增幅 86%,远超一等品和二等品。二等品预处理后验证集 R^2 仅为 0.723 7,显著低于优等品和一等品,优等品与一等品模型决定系数 R^2 均 > 0.75 ,而最低的一等品模型决定系数也达到 0.72,因此,所建立模型可以有效用于蓝莓品质的在线快速检测。

3 蓝莓品质在线无损评价系统的应用验证

3.1 验证样品

验证所用蓝莓样品为南高丛蓝莓品种珠宝。根据 GB/T 27658—2011、NY/T 3033—2016 对蓝莓进行等级划分,挑选出 3 种等级的蓝莓样品,将每个等级的蓝莓样品按照 125 g 分装。

3.2 蓝莓果径精度与均匀度预测

3.2.1 果径检测精度 对蓝莓综合品质在线快速无损检测评价系统的精度进行应用验证,传送带速度为 2 000 mm/min,蓝莓果径在线检测精度结果见表 3。结果表明,蓝莓果径检测的相对误差平均值为 0.093,且最大绝对误差 ≤ 2 mm,果径大小的精度可以满足在线检测分级要求。

表 2 蓝莓可溶性固形物含量 PLS 定量模型建模结果

Table 2 Modeling results of the PLS quantitative model for the soluble solids content of blueberries

等级	预处理方法	特征变量数	训练集		验证集	
			RMSEC	R^2_C	RMSEP	R^2_P
优等品	原始光谱	150	1.131 6	0.483 1	1.201 6	0.453 2
	SG 平滑		1.153 2	0.455 2	1.223 2	0.425 2
	SNV		0.961 2	0.614 4	1.031 2	0.584 4
	MSC		0.944 5	0.626 1	1.014 5	0.596 1
	一阶导数		0.871 5	0.712 4	0.941 5	0.682 4
一等品	二阶导数		0.802 1	0.841 2	0.887 1	0.784 5
	SG-二阶导数		0.753 4	0.901 2	0.831 6	0.843 4
	原始光谱		1.245 8	0.423 1	1.315 8	0.393 1
	SG 平滑		1.268 5	0.395 2	1.338 5	0.365 2
	SNV		1.076 5	0.554 4	1.146 5	0.524 4
二等品	MSC		1.059 0	0.566 1	1.129 0	0.536 1
	一阶导数		0.986 0	0.652 4	1.056 0	0.622 4
	二阶导数		0.915 0	0.781 2	1.034 6	0.724 5
	SG-二阶导数		0.863 0	0.841 2	0.951 0	0.782 2
	原始光谱		1.360 0	0.363 1	1.430 6	0.333 1
	SG 平滑		1.383 8	0.335 2	1.453 8	0.305 2
	SNV		1.191 8	0.494 4	1.261 8	0.464 4
	MSC		1.173 5	0.506 1	1.243 5	0.476 1
	一阶导数		1.100 5	0.592 4	1.170 5	0.562 4
	二阶导数		1.027 0	0.721 2	1.112 0	0.664 5
	SG-二阶导数		0.972 5	0.781 2	1.070 5	0.723 7

3.2.2 各等级果径均匀度判别 市售蓝莓的果径均匀度大多在 95% 以上。试验果径均匀度的标准以 95% 为参考评价指标。通过不同等级蓝莓果径均匀度混合,与设备预测出的均匀度进行比较,结果见表 4。在 15 组样品中,相对误差绝对值最大为 0.011 6。以果径均匀度 95% 为样品合格标准,将样品分为合格与不合格两类,并采用蓝莓

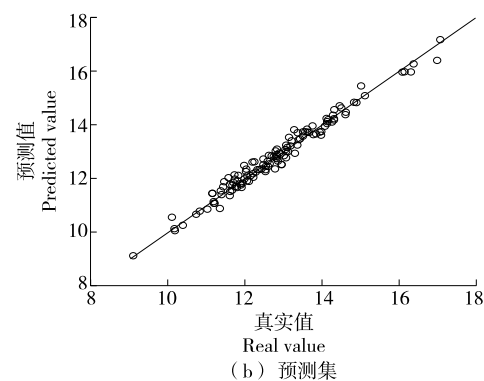
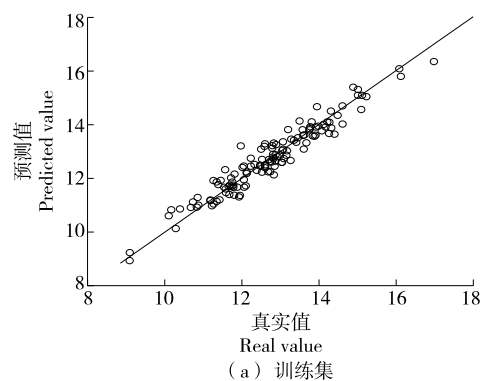


图 11 蓝莓可溶性固形物 PLSR 模型检测结果

Figure 11 Detection results of the PLSR model for soluble solids in blueberries

表 3 蓝莓果径检测精度

Table 3 Fruit diameter detection accuracy for blueberries				
样品号	实际平均 果径/mm	检测值/ mm	绝对最大误 差/mm	相对误差 绝对值
1	16.23	17.69	1.46	0.090
2	16.47	17.42	0.95	0.058
3	17.05	16.81	−0.24	0.014
4	15.76	16.49	0.73	0.046
5	16.79	18.84	2.05	0.122
6	13.62	12.31	−1.31	0.096
7	14.41	13.71	−0.70	0.049
8	13.73	12.12	−1.61	0.117
9	12.88	13.94	1.06	0.082
10	14.12	13.34	−0.78	0.055
11	10.37	11.33	0.96	0.093
12	11.24	10.09	−1.15	0.102
13	10.05	8.16	−1.89	0.188
14	9.64	8.41	−1.23	0.128
15	9.42	7.96	−1.46	0.155
平均值	/	/	1.172	0.093

综合品质在线快速无损检测评价系统进行判别,各等级果径均匀度识别准确率见表 5。优等品与二等品果径均匀度判别准确性均在 90% 以上,而一等品则为 80% 以上,蓝莓果径均匀度识别平均准确率为 91.85%,可以达到准

表 4 蓝莓果径均匀度判别结果

Table 4 Discrimination results of fruit diameter uniformity for blueberries					
样品号	蓝莓总个数/颗	其他等级混 合数量/颗	实际果径 均匀度/%	预测果径 均匀度/%	相对误差 绝对值
1	58	4	93.10	93.08	0.000 2
2	55	1	98.19	97.48	0.007 2
3	56	2	96.43	95.31	0.011 6
4	60	3	95.00	95.22	0.002 3
5	60	2	96.67	96.72	0.000 5
6	58	3	94.48	94.76	0.003 0
7	45	1	97.78	97.46	0.003 3
8	50	2	96.00	96.42	0.004 4
9	52	2	96.15	96.21	0.000 6
10	54	1	98.15	98.21	0.000 6
11	56	3	94.46	94.10	0.003 8
12	51	2	96.08	96.14	0.000 6
13	52	2	96.15	96.26	0.001 1
14	53	1	98.11	98.23	0.001 2
15	54	2	96.30	96.37	0.000 7

表 5 蓝莓果径均匀度判别准确率

Table 5 Accuracy of blueberry fruit diameter uniformity						
等级	实际混合 结果	数量/ 盒	设备识别结果		准确 率/%	平均准确 率/%
			合格	不合格		
优等品	合格	45	43	2	95.56	91.85
	不合格	45	3	42	93.33	
一等品	合格	45	40	5	88.89	80.00
	不合格	45	8	37	82.22	
二等品	合格	45	42	3	93.33	91.85
	不合格	45	1	44	97.78	

确区分蓝莓的果径均匀度的要求。

3.3 蓝莓可溶性固形物预测精度

对蓝莓综合品质在线快速无损检测评价系统的可溶性固形物预测精度进行应用验证,在线预测精度结果见表 6。结果表明,可溶性固形物预测模型的平均绝对误差为 0.080 5 Brix,平均相对误差为 0.678%,表明模型整体精度较高,满足无损检测需求。

表 6 蓝莓可溶性固形物预测判别部分结果

Table 6 Prediction and discrimination of blueberry soluble solids					
样品号	实际平均可溶 性固形物/Brix	检测值/ Brix	绝对最大 误差/Brix	相对误差 绝对值	
1	11.87	11.922 5	0.052 5	0.004 4	
2	12.14	12.125 4	0.014 6	0.001 2	
3	11.89	11.958 4	0.068 4	0.005 8	
4	11.71	11.870 8	0.160 8	0.013 7	
5	11.72	11.695 3	0.024 7	0.002 1	
6	12.17	12.145 3	0.024 7	0.002 0	
7	12.21	12.376 8	0.166 8	0.013 7	
8	12.13	12.211 0	0.081 0	0.006 7	
9	12.13	12.080 4	0.049 6	0.004 1	
10	12.55	12.607 3	0.057 3	0.004 6	
11	12.13	12.081 1	0.048 9	0.004 0	
12	12.27	12.220 9	0.049 1	0.004 0	
13	12.23	12.255 6	0.025 6	0.002 1	
14	11.85	11.648 0	0.202 0	0.017 0	
15	11.17	10.987 9	0.182 1	0.016 3	
平均值			0.080 5	0.006 8	

4 结论

研究基于光谱图像融合技术设计了一套蓝莓综合品质评价系统,该系统包括果盒链式输送模块、图像检测模块、近红外光谱检测模块、控制系统模块,能实现蓝莓果径尺寸、品质均匀度以及内部糖度的在线无损检测与评

价。图像检测模块中,采用深度学习中的YOIOv8-seg实例分割模型计算得到每盒蓝莓中独立个体的果径,并实现了蓝莓果径均匀度判别。果径检测平均误差为0.093,果径均匀度判别准确率为91.85%。近红外光谱检测模块中,选择SG卷积平滑联合二阶导数预处理结合连续投影算法提取特征变量建立偏最小二乘回归模型,优等品判别相关系数为0.843 4,判别错误率均方根误差为0.831 6,一等品判别相关系数为0.782 2,判别错误率均方根误差为0.951 0,二等品判别相关系数为0.723 7,判别错误率均方根误差为1.070 5。研究所构建的蓝莓品质在线无损评价系统采用模块化设计,便于后期的维护升级。未来可集成更多内部品质指标(如硬度、酸度),构建多维决策模型或者结合深度学习提升蓝莓品质特征提取稳健性,以进一步提高系统的预测精度。

参考文献

- [1] 张丽娟,夏其乐,陈剑兵,等. 近红外光谱的三种蓝莓果渣花色苷含量测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(7): 2 246-2 252.
- [2] OKAN O T, DENİZ İ, YAYLI N, et al. Antioxidant activity, sugar content and phenolic profiling of blueberries cultivars: a comprehensive comparison[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2018, 46(2): 639-652.
- [3] YANG W J, GUO Y X, LIU M, et al. Structure and function of blueberry anthocyanins: a review of recent advances[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 88: 104864.
- [4] KALT W, CASSIDY A, HOWARD L R, et al. Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins[J]. Advances in Nutrition, 2020, 11(2): 224-236.
- [5] GÜNDÜZ K, SERÇE S, HANCOCK J F. Variation among highbush and rabbiteye cultivars of blueberry for fruit quality and phytochemical characteristics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2015, 38: 69-79.
- [6] KADER A A. Fruit maturity, ripening, and quality relationships [J]. Acta Horticulturae, 1999(485): 203-208.
- [7] FALLAH A A, SARMAST E, JAFARI T. Effect of dietary anthocyanins on biomarkers of glycemic control and glucose metabolism: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. Food Research International, 2020, 137: 109379.
- [8] 周江伟,孔悦,孙锐,等. 山东引种蓝莓品质指标综合评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 56-63.
- [9] ZHOU J W, KONG Y, SUN R, et al. Comprehensive evaluation of quality index of introduced blueberry in Shandong Province [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 56-63.
- [10] DARIAN J C, TUCCI L. Developing marketing strategies to increase vegetable consumption[J]. Journal of Consumer Marketing, 2013, 30(5): 427-435.
- [11] ENDRIZZI I, TORRI L, COROLLARO M L, et al. A conjoint study on apple acceptability: sensory characteristics and nutritional information[J]. Food Quality and Preference, 2015, 40: 39-48.
- [12] 向阳,林洁雯,李亚军,等. 芒果双面成熟度在线检测分级系统[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 259-266.
- [13] XIANG Y, LIN J W, LI Y J, et al. Mango double-sided maturity online detection and classification system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 259-266.
- [14] 廖志强,何崇训. 基于近红外光谱技术的苹果糖度预测及分级研究[J]. 信息技术与信息化, 2023(10): 93-98.
- [15] LIAO Z Q, HE C X. Prediction and grading of apple sugar content based on near-infrared spectroscopy[J]. Information Technology and Informatization, 2023(10): 93-98.
- [16] 文静,马雯,张昂,等. 高光谱技术在葡萄品质无损检测应用上的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 357-367.
- [17] WEN J, MA W, ZHANG A, et al. Research progress on the application of hyperspectral technology for non-destructive testing of grape quality[J]. Food Science, 2024, 45(21): 357-367.
- [18] 高燕飞,徐雪峰,黄余,等. 基于物联网和机器学习的番茄内外品质在线检测[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 78-85.
- [19] GAO F Y, XU X F, HUANG Y, et al. Online detection of tomato internal and external quality based on IoT and machine learning[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 78-85.
- [20] 魏晶鑫,陈中举,许浩然. 融合 Fasternet 与 YOLOv5 模型的鸡蛋外观检测[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 105-112, 165.
- [21] WEI J X, CHEN Z J, XU H R. Detection of egg appearance based on Fasternet and YOLOv5 model[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 105-112, 165.
- [22] 赵慧芳,吴文龙,黄正金,等. 34个蓝莓品种果实品质评价[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(4): 44-53, 72.
- [23] ZHAO H F, WU W L, HUANG Z J, et al. Evaluation on fruit quality of 34 *Vaccinium* spp. cultivars[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, 32(4): 44-53, 72.
- [24] 孙亚英. 线阵 CCD 在工业检测中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2014(16): 149.
- [25] SUN Y Y. Application of line-scan CCD in industrial inspection [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014 (16): 149.
- [26] QIU G J, CHEN B, LU H Z, et al. Nondestructively determining soluble solids content of blueberries using reflection hyperspectral imaging technique[J]. Agronomy, 2024, 14(10): 2 296.

- [19] SANCHEZ-BALLESTA M T, MARTI-ANDERS C, ÁLVAREZ M D, et al. Are the blueberries we buy good quality? comparative study of berries purchased from different outlets[J]. *Foods*, 2023, 12(13): 2 621.
- [20] 韩亚芬, 吴尘萱, 吴海华, 等. 基于可见—近红外光谱技术的果蔬品质检测方法[J]. *农业工程*, 2024, 14(1): 95-101.
HAN Y F, WU C X, WU H H, et al. Detection method of fruit and vegetable quality based on VIS-NIR spectroscopy[J]. *Agricultural Engineering*, 2024, 14(1): 95-101.
- [21] 唐子叶, 文韬, 代兴勇, 等. 光照区域对近红外光谱在线检测柚子糖度的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(6): 124-129.
TANG Z Y, WEN T, DAI X Y, et al. Research on influence of light region on near infrared spectroscopy for online detection of sugar content of grapefruit[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(6): 124-129.
- [22] 汪志强, 李大鹏, 刘强, 等. 基于温度修正和可见/近红外光谱的油茶籽含水率检测[J]. *食品与机械*, 2022, 38(12): 127-132.
WANG Z Q, LI D P, LIU Q, et al. Water content detection of *Camellia oleifera* seeds based on temperature correction and visible/near infrared spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(12): 127-132.
- [23] LITTLE C M, CHAPMAN T W, HILLIER N K. Effect of color and contrast of highbush blueberries to host-finding behavior by *drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2018, 47(5): 1 242-1 251.
- [24] 朱旭, 马溥, 姬江涛, 等. 基于 Faster R-CNN 的蓝莓冠层果实检测识别分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(6): 1 493-1 501.
ZHU X, MA H, JI J T, et al. Detecting and identifying blueberry canopy fruits based on Faster R-CNN[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(6): 1 493-1 501.
- [25] GAMANI A A, ARHIN I, ASAMOAH A K. Performance evaluation of YOLOv8 model configurations, for instance segmentation of strawberry fruit development stages in an open field environment[EB/OL]. (2024-08-11) [2025-01-06]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.05661>.
- [26] 唐兴萍, 王白娟, 杨红欣, 等. 基于 YOLOv8 的水果外观检测与分类方法[J]. *食品与机械*, 2024, 40(7): 103-110.
TANG X P, WANG B J, YANG H X, et al. Research on fruit appearance detection and classification method based on YOLOv8[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(7): 103-110.
- [27] ZHANG Z J, ZOU Y L, TAN Y F, et al. YOLOv8-seg-CP: a lightweight instance segmentation algorithm for chip pad based on improved YOLOv8-seg model[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 27716.
- [28] TIAN Y N, YANG G D, WANG Z, et al. Instance segmentation of apple flowers using the improved mask R-CNN model[J]. *Biosystems-Engineering*, 2020, 193: 264-278.
- [29] TIAN Y W, WU W, LU S Q, et al. Application of deep learning in fruit quality detection and grading[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 260-270.
- [30] SUN Q, LI H, ZHANG Z. Detection and classification of fruit defects based on YOLOv8 deep learning algorithm[J]. *Food Control*, 2023, 147: 109637.
- [31] 王甜甜, 冯国红, 朱玉杰. 近红外光谱结合化学计量学方法快速检测蓝莓可溶性固形物和维生素 C 含量[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(16): 297-305.
WANG T T, FENG G H, ZHU Y J. Rapid determination of soluble solids and vitamin C in blueberry by near infrared spectroscopy combined with chemometrics[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(16): 297-305.
- [32] 李瑞, 傅隆生. 基于高光谱图像的蓝莓糖度和硬度无损测量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(S1): 362-366.
LI R, FU L S. Nondestructive measurement of firmness and sugar content of blueberries based on hyperspectral imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(S1): 362-366.
- [33] 李颖, 陈元胜, 吕靓, 等. 基于近红外特征变量筛选对火麻油掺杂的快速检测[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 574-579.
LI Y, CHEN Y S, LÜ L, et al. Fast detecting the adulteration of hemp seed oil based on characteristic variables optimization of NIR spectroscopy[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 574-579.