

引用格式:

刘豪, 龚中良, 文韬, 王志宇, 代兴勇. 基于可见/近红外光谱的柑橘糖度在线检测分选系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 497–502.

LIU H, GONG Z L, WEN T, WANG Z Y, DAI X Y. Design and experiment of an online detection and sorting system for citrus sugar content based on visible/near infrared spectroscopy[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(4): 497–502.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于可见/近红外光谱的柑橘糖度在线检测分选系统的设计与试验

刘豪, 龚中良*, 文韬, 王志宇, 代兴勇

(中南林业科技大学机电工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 在 6GF-4 型林果无损检测与分选成套设备中, 设计了基于可见/近红外光谱的柑橘糖度在线检测分选系统, 系统主要包括传输装置、光谱采集装置、控制系统以及分选装置。系统在柑橘果实运动状态中采集其光谱信息, 并通过所建立的果实糖度模型进行同步计算, 根据所得糖度值对柑橘果实实现在线分选。在光谱采集装置中设计了双透镜式光路, 可改变投射于柑橘果实上的光斑大小, 通过研究比较试验参数积分时间和光斑尺寸大小, 得出系统的最佳采集参数为积分时间 100 ms, 光斑尺寸设置为小, 样本移动速率为 5 个/s。建立的 SPXY-CARS-PLSR 柑橘糖度在线检测模型校准集和预测集的决定系数分别为 0.938 和 0.836, 校准集和预测集的均方根误差分别为 0.273 Brix 和 0.418 Brix 。使用未参与建模的 25 个柑橘果实样本进行外部验证集的在线检测和分选, 结果在 1 Brix 的误差范围内, 检测糖度的准确率为 92%; 当样本分为 4 个等级时, 系统分选正确率为 92%; 当样本分为 3 个等级时, 系统分选正确率可达 100%。

关键词: 柑橘; 糖度; 在线检测; 可见/近红外光谱; 积分时间; 光斑尺寸

中图分类号: TP271+.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)04-0497-06

Design and experiment of an online detection and sorting system for citrus sugar content based on visible/near infrared spectroscopy

LIU Hao, GONG Zhongliang*, WEN Tao, WANG Zhiyu, DAI Xingyong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: In the 6GF-4 forest fruit non-destructive testing and sorting equipment, an online citrus sugar content detection and sorting system was designed based on visible/near-infrared spectroscopy technology. The system mainly includes transmission devices, spectral acquisition devices, control systems, and sorting devices, which achieves spectral information collection during citrus movement, and synchronously calculates through the established sugar content model, achieving online sorting based on the obtained sugar content values. A dual lens optical path has been designed in the spectral acquisition device, to change the size of the light spot transmitted on citrus fruits. By comparing and analyzing the integration time and spot size of the experimental parameters, it is found that the optimal collection parameters for the system were the integration time of 100 ms, the spot size set to small, and the sample movement rate of 5 pieces/s. An SPXY-CARS-PLSR online detection model was established for citrus sugar content. The determination coefficients is 0.938 and 0.836 for the calibration and prediction sets of the model, respectively. The root mean square error is 0.273 Brix and 0.418 Brix for the calibration and prediction sets, respectively. 25 citrus samples not involved in modeling were used for online detection and sorting of external validation sets. It is found that the detecting sugar contents are within the error range

收稿日期: 2022-03-11

修回日期: 2023-04-08

基金项目: 湖南省科学技术厅研发计划项目(2018NK2066); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4142); 湖南省教育厅林业杰青培养科研项目(XLK202108-7); 湖南省教育厅重点项目(20A515)

作者简介: 刘豪(1996—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事农产品品质无损检测技术应用研究, liuhaoh@csuft.edu.cn; *通信作者, 龚中良, 博士, 教授, 主要从事农业装备自动化、机电一体化技术及应用研究, gzlaa@163.com

of 1 Brix with the accuracy of 92%. When the sample is divided into 4 levels, the system's sorting accuracy is 92%; When the samples are divided into three levels, the system's sorting accuracy can reach 100%.

Keywords: citrus; sugar content; online detection; visible/near-infrared spectroscopy; integration time; spot size

可见/近红外光谱(Vis-NIR)检测技术已经应用于梨黑心病的无损检测^[1]、柑橘黄龙病的无损检测^[2]、茶油原产地鉴别^[3]、芒果成熟度检测^[4]、花生蛋白组分检测^[5]等,对类球状水果的可溶性固形物含量的在线检测和分级也已取得进展^[6]。ZHAO 等^[7]开发了苹果内部品质自动检测与分类机器人系统,利用末端执行器抓取苹果时采集近红外光谱,对苹果可溶性固形物含量进行预测,预测均方根误差为 0.393,单个样本的分类耗时约为 5.2 s。李龙等^[8]设计了苹果内外品质检测分级系统,采用漫反射检测方式,预测集均方根误差为 0.448 7,单个样本的检测时间为 0.71 s。刘燕德等^[9]采用漫透射光路,以托盘式果杯运输方式进行番茄的糖度含量和碰伤情况同时在线检测,其中,糖度含量预测均方根误差为 0.43,分选正确率为 91%。高荣杰^[10]以 4 个环形布置且向下倾斜的卤钨灯照射样本赤道部位,以 3 个/s、积分时间 100 ms 的试验条件采集光谱信息,建立的苹果糖度预测模型预测集相关系数为 0.89,均方根误差为 0.69 Brix。

笔者在 6GF-4 型林果无损检测与分选成套设备中设计了双透镜式光路的柑橘糖度的在线检测分选系统:通过改变光斑大小,并以不同采集参数在线采集柑橘果实的可见/近红外光谱,建立柑橘果实糖度的预测模型;将最优预测模型应用于糖度分选系统,进行了综合性能测试与外部验证。

1 柑橘糖度在线检测分选系统的结构与工作原理

柑橘糖度在线检测与分选系统的结构如图 1 所

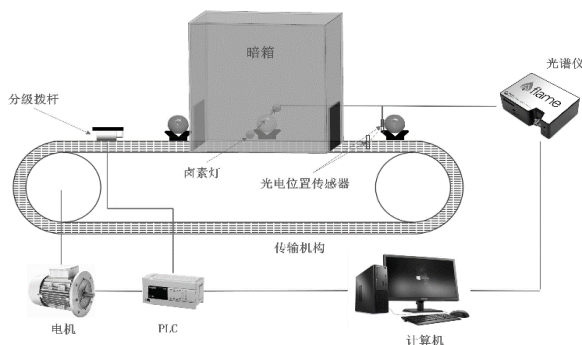
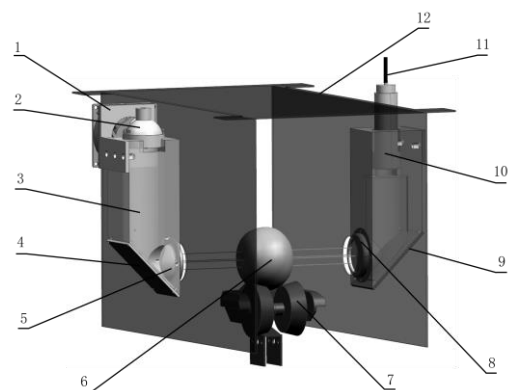


图 1 柑橘糖度在线检测与分选系统的结构

Fig.1 Structure of online detection and sorting system for citrus sugar content

示。系统主要包括传输装置、光谱采集装置、控制系统和分选装置。

传输装置采用链传动方式,通过变频器进行调速,利用双锥滚子式果杯运输柑橘果实,以减少碰撞损伤,便于后续分级。光谱采集装置如图 2 所示。以带有灯杯的卤素灯作为光源,直流电源,电压 12 V,功率 50 W,灯杯型号为 MR16。为尽量减少光源光照强度的损失,完成对光斑大小的调节,采用双凸透镜光路:中间的凸透镜使用插拔式模块装载,当模块未装载透镜时,柑橘表面形成小光斑,光斑直径约 40 mm;装载凸透镜时形成大光斑,光斑直径约 80 mm。因光路装置需装载于在线设备上,为节省空间,采用 45°平面镜,以减小产线垂直方向占用空间。出射光路中同样也装备了 1 个凸透镜,安装方向相反,主要起到准直光线的作用。为进一步提高光谱采集强度,减小光束发散角,出射光路末端增加了光纤准直镜。光路置于黑箱箱体中,装置进出口加装黑色遮光帘,以减小杂散光的影响。



1 散热风扇; 2 卤素灯; 3 插拔式模块; 4 平面镜;
5 凸透镜; 6 柑橘样本; 7 双锥滚子式果杯; 8 凸透镜;
9 平面镜; 10 准直镜; 11 接收光纤; 12 黑箱箱体。

图 2 光谱在线采集装置

Fig.2 Spectrum online acquisition device

控制系统主要由 PLC、光电位置传感器和自行开发的光谱检测软件共同组成。传输路径上设有光电位置传感器,果杯通过时触发一次光电开关,光谱仪接收光电位置传感器的高电平信号后,实时采集柑橘果实的可见/近红外光谱数据,检测软件实现采集参数的设置以及光谱数据的实时记录与分析,

根据导入的糖度预测模型对柑橘果实糖度进行实时检测并得出对应糖度,再发送对应的指令到 PLC,当柑橘被传输到对应分级箱位置时,分级装置根据设置的程序驱动对应的电磁分级拨杆,完成柑橘糖度的在线检测与分选。

柑橘糖度在线检测与分选系统控制器选用三菱 PLC,型号为 FX3U-64MT。光谱仪为海洋光学公司(美国)FLAME-S-VIS-NIR-ES 光谱仪,探测器配置索尼 ILX511B 线阵硅基检测器,检测波长范围为 350~1050 nm,像素个数为 2048,即波长点个数为 2048。

2 光谱信息采集与糖度测定

2.1 光谱信息采集

选取 70 个果径 65~85 mm 柑橘果实样本,清洗后编号,在 20 °C、相对湿度 40%的室内存放 24 h 后,在线采集它们的可见/近红外光谱信息。

对光谱检测的积分时间的长短以及光斑大小进行对比分析,以确定最佳采集参数。试验采取的传输速度为 5 个/s,积分时间分别为 50、80、100 ms,积分时间的更改在自主开发的软件上完成。设备运行平稳后开始试验,关闭光源,以采集暗光谱数据;打开光源,以空气作为试验参比,采集亮光谱数据。柑橘果实样本均通过人工放置,以确保位姿均为样品果梗与光路方向平行,赤道面与光路垂直,以降低果梗对光信号的影响。每一样本在相同条件下采集 3 次,计算其平均光谱作为每个样品的最终光谱。为尽可能消除杂散光对光谱检测的影响,采用样本的透射率作为建模分析和检测数据。

在对光斑大小性能检测时,入射光路中插入装载有透镜的插拔式模块或未装载透镜的插拔式模块,使用 2 种光斑条件下采集到的所有样本的平均光谱进行对比。

基于确定的最佳采集参数,采集 124 个柑橘果实样本的在线光谱,每个样本以同样姿态采集 3 次,取其平均光谱作为最终数据建模用光谱。

2.2 柑橘果实糖度值的测定

采集柑橘果实光谱数据后,将柑橘果实剥皮并套上过滤袋,使用手动榨汁机压榨出汁并编号。使

用清水标定零点后,滴取样本汁液于糖度计(PAL-1 型)的检测槽内。每个样品重复测量 3 次,取其平均值作为糖度参考值。

3 柑橘果实糖度预测模型的建立

模型性能通过校正集和预测集的决定系数(R^2 和 R_p^2)和均方根误差(RMSEC 和 RMSEP)进行评价, R^2 和 R_p^2 越接近于 1, RMSEC 和 RMSEP 越小且越接近,则模型的稳定性与精度越好^[11]。试验采用 X-Y 共生距离法(SPHY),以 3:1 的比例进行样本集的划分。由于在线采集过程中会受到杂散光、机械振动的影响,因而采用 SG 平滑对所采集的光谱数据进行预处理,以提高信噪比^[12]。光谱数据中各波长点之间存在多重共线性,这会降低模型精度以及增加预测模型计算所需时间,所以对光谱数据进行特征波长选取,以提升模型预测准确性和实用性。采用竞争自适应重加权算法(CARS)进行特征波长选取,上述数据分析过程均在 Matlab2019a 中进行。模型的建立方法为偏最小二乘回归法(PLSR),建模计算运用 Unscrambler X10.4 完成。

3.1 积分时间对建模结果的影响

积分时间决定光谱仪探测器单次采集光子信息的持续时间,其值的大小通常需要小于样本运输周期,在线检测时各部件的通讯时间以及数据处理时间也需要考虑在内。光谱仪外触发接口响应延迟时间约 35 ms,采用 PLC 接收光电门信号以及发送脉冲需 20 ms 左右,光谱仪读取 FIFO 缓存数据和程序计算时间合计约 30 ms,为确保在线检测时不发生信息紊乱,通常需要留出波动时间约 10 ms;因此,采用积分时间 50、80、100 ms 采集样本光谱信息,对比分析建模效果。

从 70 个柑橘果实不同积分时间的透射率(图 3)可看出,不同积分时间的平均光谱波峰、波谷出现的位置类似,在 650、700、800 nm 附近出现了较为明显的波峰,在 680 nm 和 820 nm 附近出现了较为明显的波谷;在 600~800 nm,随着积分时间的增加,透射率也增加,这表明积分时间的增加可能在谱图中反映出更多的样本内部品质信息。

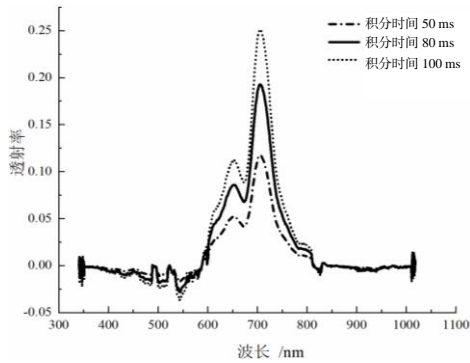


图3 柑橘果实不同积分时间的透射率

Fig.3 Transmittance under different integration times

表1 不同积分时间的糖度预测模型结果

Table 1 Results of sugar content prediction models under different integration times

积分时间/ms	主成分个数	R_c^2	R_p^2	RMSEC/°Brix	RMSEP/°Brix
50	8	0.788	0.732	0.437	0.451
80	10	0.823	0.739	0.412	0.457
100	10	0.873	0.794	0.386	0.433

3.2 光斑大小对建模结果的影响

分别采集大光斑状态和小光斑状态下的柑橘果实光谱数据, 所得平均光谱如图4所示。与积分时间的影响相比, 光斑大小的影响较小, 波峰、波

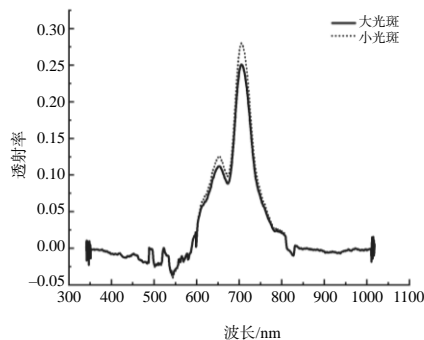


图4 柑橘果实不同光斑状态下的透射率

Fig.4 Transmittance under different spot sizes

表2 不同光斑大小的糖度预测模型结果

Table 2 Results of sugar content prediction models under different spot sizes

光斑大小	主成分个数	R_c^2	RMSEC/°Brix	R_p^2	RMSEP/°Brix
大光斑	10	0.873	0.386	0.794	0.433
小光斑	10	0.882	0.374	0.798	0.414

3.3 在线检测模型的建立

调整积分时间为 100 ms、光斑为小光斑、柑橘移动速度为 5 个/s, 采用 SPXY 方法对 124 个柑橘果实样本进行校正集和预测集的划分, 校正集与预测集的平均值接近且糖度最大值与最小值均在校正集内。竞争性自适应重加权算法(CARS)^[13]是一种基于蒙特卡罗随机采样和 PLS 决定系数的特征波

为探究积分时间对建模结果的影响, 使用 70 个柑橘果实样本在不同积分时间下的光谱数据进行 PLSR 建模。由于光谱仪获取的光谱信号在两端的信噪比较低, 为避免噪声信号干扰和数据冗余对建模结果造成负面影响, 选取波长 500~850 nm 的光谱数据建模, 建模结果(表1)表明, 积分时间为 100 ms 时, 校正集和预测集的决定系数分别为 0.873 和 0.794, 校正集和预测集的均方根误差分别为 0.386 °Brix 和 0.433 °Brix, 建模效果最好, 这表明积分时间的增加与模型性能呈正相关。

谷的出现波段仍然相近, 小光斑在 710 nm 附近的透射率略高于大光斑的, 这可能是在有限的积分时间里, 小光斑较高的光照效率使得透射率更高。

相同速度和相同积分时间条件下, 光斑大小能够对光谱检测造成影响。柑橘果实属于非均匀介质, 介质内部的密度起伏以及分子的各向异性会使光能量的空间分布发生变化, 而光斑区域的缩小, 在取得较高光照效率的同时, 使得光路过程中的散射程度降低, 接收光路能够获取更多样本信息。为验证光斑大小对建模结果的影响, 取相同波段 500~850 nm 数据进行 PLSR 建模, 建模结果(表2)表明, 小光斑的建模效果优于大光斑的, 可见双透镜光路设计可有效优化在线检测效果。

长选取方法。CARS 算法随着运行次数的增加, 保留的波长变量越来越少, 在前 23 次运行中, 均方根误差随着运行次数的增加而减少, 23 次运行之后, 均方根误差随着运行次数的增加而增加, 此时特征波长个数为 67 个。由运行次数与各变量回归系数的变化关系可知, 在运行次数为 23 时, 交互验证均方根误差出现最低点, 故保留波长为 23 次运行结果的 67 个特征波长。

在建模方法中,对比了划分集合后的原始光谱进行偏最小二乘建模和经过 CARS 筛选特征波长后

再进行偏最小二乘建模 2 种建模方式,结果如表 3 所示。

表 3 糖度预测模型的比较

Table 3 Comparison between different sugar content prediction models

建模方法	波长个数	R_c^2	RMSEC/°Brix	R_p^2	RMSEP/°Brix
SPXY-Origin-PLSR	1180	0.834	0.402	0.721	0.491
SPXY-CARS-PLSR	67	0.938	0.273	0.836	0.418

经过 CARS 筛选特征波长后,与原始光谱数据相比,波长个数大幅减少,仅为原始光谱波长个数的 5.68%。与原始光谱相比,CARS 能够较好地优

化建模结果。图 5 为所建立的 SPXY-CARS-PLSR 模型结果,a 为校正集,b 为预测集。

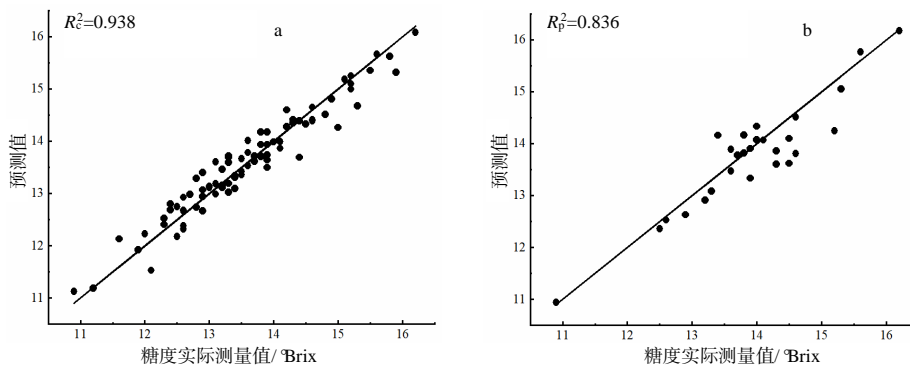


图 5 SPXY-CARS-PLSR 模型对校正集和预测集柑橘果实糖度的预测

Fig.5 Sugar content predictive results of the SPXY-CARS-PLSR model on calibration set and prediction set

4 柑橘糖度的在线检测及分选

将所建立的模型数据导入自行开发的分级软件中,采用未参与建模的 25 个柑橘果实样本进行在线检测及分选,将样本编号并采用人工上果,每个样本测试 3 次。根据 GB/T 12947—2008《鲜柑橘》中对柑橘的分级指标数,将柑橘分为 3 个等级^[4]。结合样本实际测量值的分布情况,采用 2 种分级策略对分选性能进行评估:设置分选等级数为 3 时,糖度 $S \leq 12$ 、 $12 < S \leq 14$ 、 $S > 14$,区间跨度为 2 °Brix;设置分选等级数为 4 时,糖度 $S \leq 12$ 、 $12 < S \leq 13.5$ 、 $13.5 < S \leq 15$ 、 $S > 15$,区间跨度为 1.5 °Brix。柑橘果实糖度在线检测分选结果(表 4)表明,3 次检测结果

的方差均小于 0.3,说明该系统检测性能较稳定,重复性好。在 1 °Brix 的误差范围内,糖度检测的准确率为 92%。当分选等级数为 3 时,32% 的样本检测值临近分级节点(± 0.2),容易因较小预测误差而造成分级错误。为更合理地对系统性能进行评估,分级误差范围设置为等级上下限差值的 1/4。在此标准下,当分级数为 3 时,分级正确区间为 $S \leq 12.5$ 、 $11.5 < S \leq 14.5$ 、 $S > 13.5$,系统分选正确率为 100%;当分级数为 4,分级正确区间为 $S \leq 12.38$ 、 $11.63 < S \leq 13.88$ 、 $13.13 < S \leq 15.38$ 、 $S > 14.63$,系统分选正确率为 92%,未被正确分级的样本均被分选在了相邻的分级箱内。

表 4 柑橘果实糖度在线检测分选验证结果

Table 4 Verification results of online detection and sorting of citrus sugar content

样本号	糖度/°Brix							分选结果	
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	方差	平均值	实际值	误差	分选等级数为 3	分选等级数为 4
1	15.56	15.34	15.29	0.12	15.40	14.7	0.70	正确	正确
2	14.33	14.19	14.36	0.08	14.29	14.2	0.09	正确	正确
3	13.40	13.63	13.69	0.12	13.57	13.3	0.27	正确	正确
4	13.35	13.45	13.18	0.12	13.33	12.6	0.73	正确	正确
5	13.88	13.79	13.50	0.16	13.72	13.3	0.42	正确	正确
6	14.59	14.33	13.92	0.27	14.28	13.6	0.68	正确	正确
7	12.81	12.73	12.98	0.10	12.84	12.8	0.04	正确	正确
8	14.49	14.76	14.71	0.12	14.65	15.2	-0.55	正确	正确

表 4(续)

样本编号	糖度/ $^{\circ}$ Brix					分选结果			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	方差	平均值	实际值	误差	分选等级数为 3	分选等级数为 4
9	14.82	14.97	15.08	0.10	14.96	15.2	-0.24	正确	正确
10	13.58	13.35	13.77	0.17	13.57	13.1	0.47	正确	错误
11	12.10	12.07	12.12	0.02	12.10	13.3	-1.20	正确	正确
12	13.04	13.11	12.91	0.08	13.02	12.7	0.32	正确	正确
13	13.79	13.80	13.95	0.07	13.85	13.8	0.05	正确	正确
14	13.73	13.68	13.86	0.08	13.76	14.4	-0.64	正确	正确
15	13.46	13.43	13.21	0.11	13.37	14.0	-0.63	正确	错误
16	14.11	13.87	13.98	0.10	13.99	14.0	-0.01	正确	正确
17	14.16	14.31	14.15	0.07	14.21	13.8	0.41	正确	正确
18	14.01	14.26	14.22	0.11	14.16	14.2	-0.04	正确	正确
19	12.93	13.37	13.44	0.22	13.25	13.5	-0.25	正确	正确
20	14.04	14.14	13.99	0.06	14.06	15.3	-1.24	正确	正确
21	13.89	14.07	13.96	0.07	13.97	14.2	-0.23	正确	正确
22	13.45	13.67	13.49	0.10	13.53	13.8	-0.27	正确	正确
23	13.60	13.77	13.57	0.09	13.65	14.3	-0.65	正确	正确
24	13.57	13.32	13.47	0.10	13.45	13.1	0.35	正确	正确
25	15.71	15.84	15.74	0.05	15.76	15.5	0.26	正确	正确

5 结论

开发设计了基于可见/近红外光谱的柑橘糖度在线检测与分选系统,并开发了相应的控制程序。通过在光谱采集装置上设计双透镜式光路,对积分时间和光斑大小进行比较与优化,确定最佳积分时间为 100 ms,光斑为小光斑,可取得最好的建模效果。基于该试验条件,建立了 SPXY-CARS-PLSR 柑橘糖度在线检测模型,并进行了外部验证分选试验,在 1 $^{\circ}$ Brix 的误差范围内,糖度检测的准确率为 92%。当样本糖度被分为 4 个等级时,系统分选正确率为 92%;当样本糖度被分为 3 个等级时,系统分选正确率为 100%,表明该系统可实现对柑橘糖度的在线实时检测与分选。

参考文献:

- [1] SUN X D, ZHU K, JIANG X G, et al. Non-destructive detection of blackheart and soluble solids content of intact pear by online NIR spectroscopy[J]. The Journal of Supercomputing, 2020, 76(5): 3173-3187.
- [2] 刘燕德,肖怀春,邓清,等.柑桔黄龙病近红外光谱无损检测[J].农业工程学报,2016,32(14):202-208.
- [3] 文韬,郑立章,龚中良,等.基于近红外光谱技术的茶油原产地快速鉴别[J].农业工程学报,2016,32(16):293-299.
- [4] 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.
- [5] 赵思梦,于宏威,高冠勇,等.花生蛋白组分及其亚基含量近红外分析检测方法[J].光谱学与光谱分析,

2021, 41(3): 912-917.

- [6] HUANG Y F, DONG W T, CHEN Y, et al. Online detection of soluble solids content and maturity of tomatoes using Vis/NIR full transmittance spectra[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2021, 210: 104243.
- [7] ZHAO M, PENG Y K, LI L. A robot system for the autodetection and classification of apple internal quality attributes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 180: 111615.
- [8] 李龙,彭彦昆,李永玉.苹果内外品质在线无损检测分级系统设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(9):267-275.
- [9] 刘燕德,饶宇,孙旭东,等.番茄碰伤和可溶性固形物近红外光谱同时在线检测[J].光谱学与光谱分析,2019,39(12):3910-3915.
- [10] 高荣杰.水果糖度可见/近红外光谱在线检测方法研究[D].南昌:华东交通大学,2012.
- [11] TIAN X, FAN S X, LI J B, et al. Comparison and optimization of models for SSC on-line determination of intact apple using efficient spectrum optimization and variable selection algorithm[J]. Infrared Physics and Technology, 2019, 102: 102979.
- [12] 文韬,郑立章,龚中良,等.基于近红外光谱技术的茶油脂肪酸含量的快速检测[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(6):676-681.
- [13] LI H D, LIANG Y Z, XU Q S, et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 648(1): 77-84.
- [14] 单杨,刘伟,李高阳.柑橘工业国际标准体系建设研究[J].中国食品学报,2014,14(6):1-8.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立