

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.09.023

基于机器视觉的马铃薯加工原料分选系统

Research on separation system of potato processing raw materials based on machine vision

李明 王润涛 姜微

LI Ming WANG Run-tao JIANG Wei

(岭南师范学院信息工程学院, 广东 湛江 524048)

(School of Information Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China)

摘要:目的:设计以马铃薯加工原料为对象的自动化分选系统,实现设定标准下马铃薯自动识别。方法:构建分选系统的控制流程及分选算法,通过自动传送、机器视觉采集、吸压翻转自动化获取马铃薯 2 面的图像,采用图像复原算法消除运动模糊,设计面积比、长短径、凸起检测算法对马铃薯畸形、发芽、大小进行检测,基于颜色特征构建神经网络模型对马铃薯绿皮、病斑、常色进行分类。结果:利用 BP 神经网络算法预测马铃薯外观颜色绿皮、病斑、正常的分类,以误差分数为衡量预测模型准确性的度量,神经网络的预测分类平均准确率为 96.2%。通过选取混合样本对分选系统进行测试,参照设定分选标准,分选系统对马铃薯识别正确率达到 95.92%;单薯处理耗时 3.76 s。系统运行稳定。结论:该方法用于马铃薯加工原料精量分选可行,能够满足薯制品加工生产线前端的分选需要。

关键词:机器视觉;马铃薯;精量分选;特征提取;神经网络

Abstract: Objective: Taking raw potatoes as the objects, an automatic sorting system was designed to realize the automatic identification of potato under the set standard, which provided technical support for the processing and production of potato products. **Methods:** The control flows of sorting system and sorting algorithms were constructed. Images of two sides of a potato were acquired automatically through automatic transmission, machine vision acquisition and suction pressure turning. The image restoration algorithms were used to eliminate motion blur and the

基金项目:湛江市科技计划项目(编号:2019B01075, 2019B01232);广东省普通高校青年创新人才类项目(编号:2019KQNCX074, 2018KTSCX130);广东省普通高校特色创新项目(编号:2020KTSCX074)

作者简介:李明,女,岭南师范学院实验师,硕士。

通信作者:王润涛(1983—),男,岭南师范学院副教授,博士。

E-mail: wangruntao@neau.edu.cn

收稿日期:2021-03-10

detection algorithms of area ratio, length diameter and bulge were designed to detect potatoes deformity, germination and size of potatoes. A neural network model was established based on color features to classify green skin, discoloration and normal color of potatoes. **Results:** The BP neural network algorithm was used to predict the appearance color class of green skin, disfigured spots and normal. The average accuracy of prediction classification of neural network is 96.2% by measuring the prediction model with error score. The sorting system was tested by selecting mixed samples. Referring to the sorting standard, the identification accuracy of potatoes reached 95.92% and the processing time of a single potato is 3.76 s. The system runs stably. **Conclusion:** The method is feasible for precise sorting of raw potato as processing materials, which meets the needs of sorting potatoes in the front end of processing line.

Keywords: machine vision; potato; accurate separation; feature extraction; neural network

马铃薯是全球第三大重要的粮食作物。以马铃薯为原料加工而成的薯制品达上百种,其中马铃薯淀粉、马铃薯全粉等是人们日常烹饪的主要食材,薯片、薯条等膨化食品更是受到儿童的青睐,面对严峻的食品安全问题,对马铃薯加工环节的监测管控,是保证薯制品达到食品安全标准的有效途径,加工原料的精量筛选是确保马铃薯制品安全的首要环节。中国制定了 GB/T 31784—2015《马铃薯商品薯分级与检验规程》,根据马铃薯的不同用途,规定了商品薯的检验分级标准。目前,马铃薯检验主要依靠人工方式,自动化检测尚处于理论探索阶段。自动化、标准化的检验流程必须依赖先进的科学技术,随着机器视觉技术的应用日益广泛,专家学者^[1-3]在农产品无损检测方面也取得了较大进展。但在马铃薯的无损检测方面研究成果较少,邓立苗等^[4]结合机器视觉系统和分级控制系统,根据马铃薯形状、颜色和缺陷特点,构建

了马铃薯分选系统,综合检测准确率可达到 90%;王红军等^[5]探讨了利用机器视觉技术快速获取马铃薯图像特征参数,结合多元线性回归方法,建立马铃薯质量和形状分级预测模型;田芳等^[6]利用光在马铃薯块茎组织中的透射特性设计了一种马铃薯黑心病检测机构;张撒^[7]利用图像处理技术对马铃薯投影面积、缺陷面积和投影周长进行检测;向静等^[8]针对马铃薯的损伤、绿皮、发芽状态进行识别,识别正确率达 89.7% 以上;李玉华等^[9]利用色饱和度三维几何特征的马铃薯芽眼识别方法进行芽眼纵向识别,为种薯自动切块提供技术支持;许伟栋等^[10]利用主成分分析法对形状特征数据与马铃薯形状之间的相关性进行了分析,建立了分类模型。纵观前人的研究成果,大部分以马铃薯某个外观特征为研究对象,强调算法精度的探索,而很少讨论算法是否适用于在线分选流程;神经网络算法复杂度较大,且不同特征之间存在干扰,因而影响识别精度。与马铃薯分选相关的形状特征包括大小、畸形、椭圆度,可以通过图像处理算法进行计算并设定淘汰范围,可避免贡献非必要的算法复杂度;现有研究分析样本的选择多以静态图像分析为基础,与自动化生产应用结合存在瓶颈,且在设计分类算法过程中缺乏参照国家标准的依据,难以形成统一的行业规范。

为突破现有研究的缺陷,研究拟以马铃薯加工原料为研究对象,以实现自动化分选为目标,获取由定速传送带输送的动态图像,通过运动模糊图像预处理算法复原图像信息,参照国家标准设计系统的控制流程及分选算法,检测马铃薯畸形、发芽、大小、绿皮、病斑特征,满足分选算法识别精度的同时,保证控制机构动态响应。为形成统一马铃薯分选行业规范奠定基础。

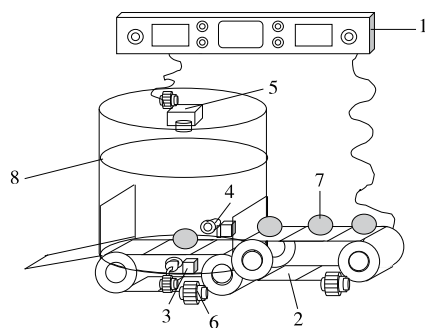
1 试验装置整体结构

马铃薯自动化分选平台结构模型如图 1 所示,平台由控制器分别对各个执行终端进行统筹调度,摄像头实时采集图像数据,马铃薯由传送带匀速运动输送到检测箱中,待对偶光电传感器检测到薯粒通过,发送信号至控制器,控制器提取摄像头当前帧图像,同时发出指令,控制对称吸盘动作,对称吸盘闭合挤压薯粒至传送带上方,旋转 180°,吸盘复位马铃薯落回传送带,控制器再次提取摄像头当前帧图像,控制器对 2 幅图像进行分析后得出分选结果显示在屏幕上。控制流程如图 2 所示,吸盘挤压马铃薯翻转与复位过程耗时约 3 s,传送带运行速度 0.05 m/s,薯粒初始间隔需大于 40 cm。分选平台每个终端动作都由配置的电机驱动完成。视觉系统采用嵌入式 DSP 技术,能够与控制核心 ARM 进行灵活的交互^[11-12]。

2 马铃薯图像预处理

2.1 运动模糊复原

马铃薯自动化分选平台是通过调节传送带的速度实



1. 控制器 2. 传送带组 3. 对偶光电传感器 4. 对称吸盘
5. 摄像头 6. 电机 7. 马铃薯 8. 光源

图 1 马铃薯分选系统结构

Figure 1 Structure of potato sorting system

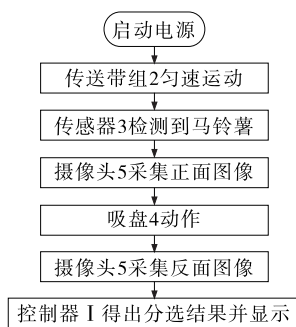


图 2 马铃薯分选控制流程

Figure 2 Potato sorting control process

现马铃薯的在线检测,因此摄像头获取的运动中的马铃薯图像必然存在运动模糊现象,图像复原是图像分析的首要步骤,是将退化图像复原为理想图像的过程。采用最小均方误差滤波综合考虑退化函数和噪声统计特征进行薯粒图像复原。

设理想图像 f 的估计值 \hat{f} ,求二者间均方误差最小。误差度量计算:

$$e^2 = E\{(f - \hat{f})^2\}, \tag{1}$$

式中:

e^2 ——最小均方差;

$E\{\dots\}$ ——期望值;

f ——未退化理想图像;

\hat{f} ——理想图像 f 的最小估计。

条件假设噪声与图像不相关,存在零均值且预估灰度级是退化图像灰度级的线性函数,则误差函数最小值频域求解见式(2)和式(3)。

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + K} \right] G(u, v), \tag{2}$$

$$H(u, v) = \frac{T}{\pi(ua + vb)} \sin[\pi(ua + vb)] e^{-j\pi(ua + vb)}, \tag{3}$$

式中:

u, v ——频域变量;

$H(u, v)$ ——退化函数;

$G(u, v)$ ——退化图像的傅里叶变换;

K ——特殊常数;

T ——曝光时间;

a ——水平移动距离;

b ——垂直移动距离。

摄像头获取的模糊退化图像如图 3 所示。

图像尺寸 688×688 像素,采用参数 $a = b = 0.1, T = 1$,迭代法选择 K ,复原后的图像如图 4 所示。

对比图 3 和图 4 发现,正常薯、斑薯、畸形薯图像的运动模糊退化问题,均可通过最小均方误差滤波算法得到较好的复原。

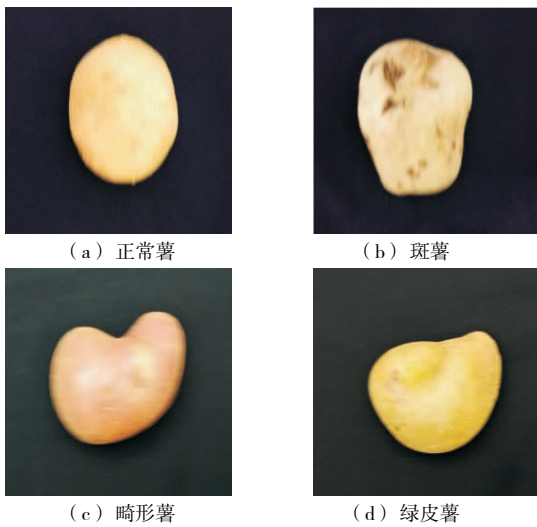


图 3 马铃薯退化图像

Figure 3 Potato degradation image

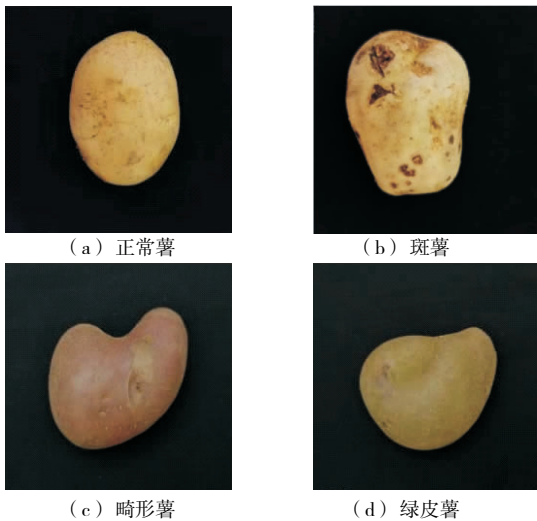


图 4 马铃薯复原图像

Figure 4 Potato reconstruction image

2.2 马铃薯图像分割

马铃薯检测平台的传送带采用黑色不反光材料,采集的马铃薯图像中马铃薯与背景的分度较大,采用迭代阈值分割法实现马铃薯与黑色背景的分割,病斑薯与绿皮薯分割效果如图 5 所示。

马铃薯形状各异,边缘轮廓是形状特征分析的基础,以畸形薯为例,对比图像与提取结果如图 6 所示。

采用 Sobel 与 Laplace 边缘检测算子,虽然边缘清晰,但薯内部呈现较多噪声,不利于边缘提取。广义 Hough 变换算法可用于检测任意形状,对算法进行优化,忽略小的闭合形状,再进一步进行骨架提取,可得到马铃薯轮廓区域。

3 马铃薯图像特征检测

利用机器视觉进行无损检测具有一定的约束性,从马铃薯图像中获取的信息可概括为两大类:边缘轮廓特征与外观灰度分布,马铃薯的畸形、发芽、大损伤会呈不规则椭圆形,而绿皮、斑点病、腐烂会以颜色灰度分布差异形式体现。

3.1 形状特征

3.1.1 面积比 相机获取拍摄区域 688×688 像素,可通过式(4)计算面积比。

$$S = \frac{A_{rea}}{688 \times 688}, \quad (4)$$

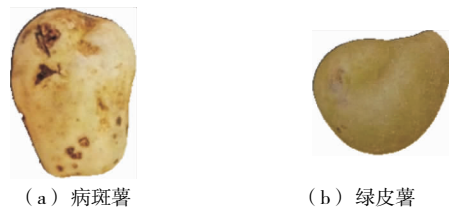


图 5 背景分割图像

Figure 5 Background segmentation image

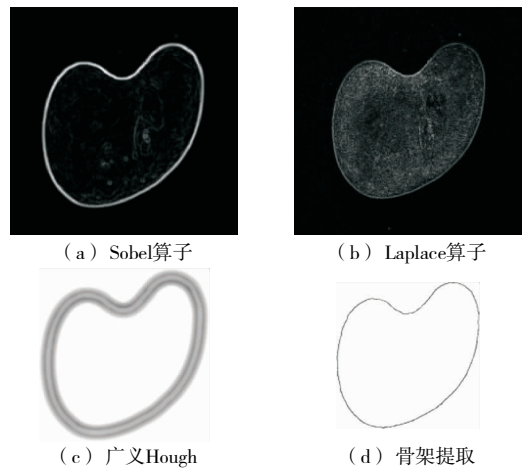


图 6 边缘检测图像

Figure 6 Edge detection image

式中:

S ——面积比;

A_{rea} ——马铃薯区域像素面积。

在同样的拍摄条件下,面积比能够充分反映马铃薯块茎的大小。

3.1.2 凸起检测 马铃薯的畸形、发芽、大损伤均会表现为表面凸起或凹陷,这里统一归类为畸形薯,提出如下凸起检测方法判定畸形薯。

(1) 如图 7 所示,求出马铃薯区域最小外接椭圆的圆心坐标 (x_0, y_0) ,从 (x_0, y_0) 向马铃薯边缘轮廓点 (x_n, y_n) 作连线 L_n , L_n 与 X 轴正向夹角 φ 。

(2) φ 逆时针增加 φ_{Δ} ,当 $(x_{\Delta n}, y_{\Delta n})$ 与 (x_n, y_n) 连线在马铃薯区域内部,且 $|L_{\Delta n} - L_n|$ 不呈数值跳变,标记为“0”,反之标记为“1”。

(3) 选择适当的 φ_{Δ} (4, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45),重复步骤(2)直至遍历一个周期,如果存在标记数组中存在“1”值,即存在凸起。

通过与人工观察对比, $\varphi_{\Delta} \leq 15$ 一般为小的凸起,如马铃薯芽体, $15 < \varphi_{\Delta} < 45$ 一般为畸形马铃薯,而马铃薯表面损伤根据损伤程度不同表现各异,采用上述凸起检测方法,如存在凸起,即判定为畸形薯。

3.1.3 长、短径检测 如图 8 所示,搜寻马铃薯轮廓直线距离最大的两点 x_0, y_0 ,线段 $x_0 y_0$ 为 R 区域最长径 L ;过线段 $x_0 y_0$ 中心点 O ,遍历搜索与轮廓相交于两点 x_1, y_1 的最短线段 $x_1 y_1$,即为最短径 d 。

3.2 颜色特征

绿皮马铃薯的外观呈不均匀青绿色分布,部分马铃薯只在某个端部呈青绿而另一端表现正常。疮痂病、黑痣病外观呈黑褐色斑块,也会出现分布不均匀现象,马铃薯自动分选平台可获取马铃薯两面的图像,即 A 面和 B 面,如果对 2 副图像进行简单的颜色分析,很难达到精确

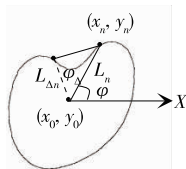


图 7 凸起检测

Figure 7 Convex detection

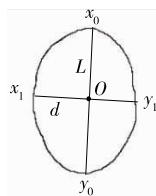


图 8 径长检测

Figure 8 Diameter detection

分类的目的。

选取正常色马铃薯样本 65 个、绿皮马铃薯样本 45 个、病斑马铃薯样本 50 个。采用 BP 神经网络算法^[13-15]预测马铃薯外观颜色绿皮、病斑、正常的分类。对每个马铃薯的 A 面和 B 面,基于 RGB、HSV、CMY 3 个颜色模型的 9 个分量,分别计算颜色均值作为判别依据,即神经网络输入层 9 个神经元,1 个隐含层,经多次验证该层神经元 5 个网络收敛速度最快,输出是 3 类,网络结构为 $9 \times 5 \times 3$,为验证算法可行性,利用交叉验证法,将 160 个样本分为 4 等份,1 份测试,3 份训练,训练样本和测试样本轮流互换,计算出误差分数以其大小作为衡量预测模型的准确性。训练网络误差曲线如图 9 所示。

从测试集中随机抽取 4 个轮次测试结果见表 1。

由表 1 可知,神经网络分选模型对病斑薯识别的准确率较高,对绿皮和正常薯的误判率较大。分析其原因,训练样本由人工目测选取,绿皮薯样本选取马铃薯表面青绿色达到 20% 以上,病斑薯样本表面病斑面积 20% 以上。马铃薯病斑为黑褐色,与正常薯土黄色差异明显,且病斑呈块状分布在表皮,在初始运动模糊图像复原过程中,复原效果较好。马铃薯绿皮存在很多“一头绿”的情况,试验所用分选装置采集同一马铃薯正反两面的图像,但仍存在两端的拍摄盲区,这会影响绿皮薯识别精度。以误差分数衡量预测模型的准确性,神经网络的预测分类平均准确率为 96.2%。

4 分选模型试验分析

分选系统先后采集马铃薯 A、B 面 2 副图像,控制中

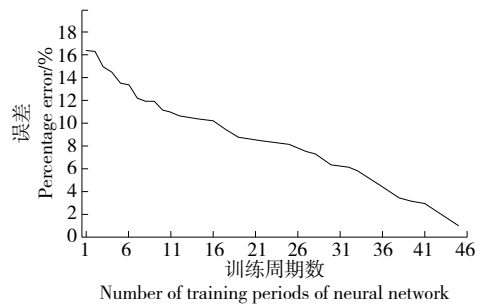


图 9 训练网络误差曲线

Figure 9 Neural network error curve

表 1 神经网络预测结果

Table 1 Nneural network predicts the results

序号	正常样本		绿皮样本		病斑样本	
	人工目测	网络识别	人工目测	网络识别	人工目测	网络识别
1	15	17	10	9	15	14
2	13	13	13	13	14	14
3	16	17	10	9	14	14
4	21	19	12	14	7	7

心分析 A 面图像得出结论 A,分析 B 面图像得出结论 B,当且仅当结论 A 与结论 B 同时为合格时,分选结果为合格,分选算法流程如图 10 所示。

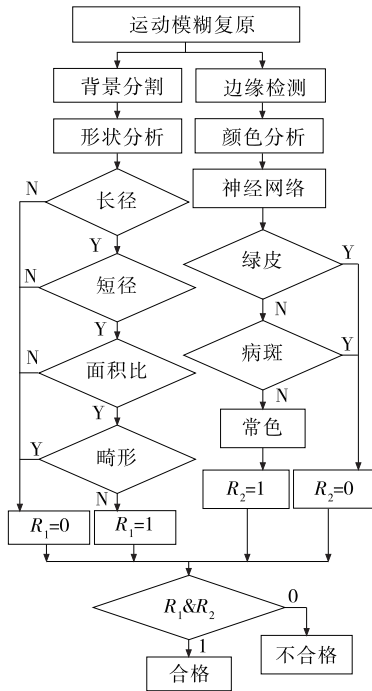


图 10 马铃薯分选算法流程

Figure 10 Potato sorting algorithm flow chart

参照 GB/T 31784—2015《马铃薯商品薯分级与检验规程》,分选系统对加工型马铃薯采用唯一标准,分选结果简化为合格与不合格两类,分选设定标准见表 2。为进一步对马铃薯分选系统进行试验分析,人工选取马铃薯样本 98 个(与前述样本不重复),采用分选系统进行分选测试,结果见表 3。

分选系统对 98 个样本分选总耗时 368 s,平均分选 1 个马铃薯耗时为 3.76 s,考虑为采集马铃薯双面图像时,需要利用对称吸盘挤压马铃薯翻转,机械终端响应耗时问题有待进一步优化。采用分选系统分选时,发芽薯 1 个误判为畸形薯、绿皮且畸形薯 1 个误判为畸形薯、绿皮薯 2 个误判为合格薯,正确率为 95.92%,表明该系统用于马铃薯加工原料精量分选可行,能够满足薯制品加工生产线前端的分选需要。

表 2 马铃薯分选标准

Table 2 Standards for sorting potatoes

参数	单位	要求
长径	cm	7.5~17.5
短径	cm	4.5~9.5
面积比		0.3~0.6
凸起、发芽		无
绿皮面积	%	<20
病斑面积	%	<20

表 3 马铃薯分选系统测试结果

Table 3 Test results of potato sorting system

方法	合格薯	绿皮	畸形	病斑	超大薯	超小薯	发芽薯	绿皮畸形薯	病斑超大薯
人工分选	17	13	12	12	10	10	7	8	9
分选系统	19	11	14	12	10	10	6	7	9
误判数	2	2	2	0	0	0	1	1	0

5 结论

利用机器视觉技术、嵌入式技术与自动控制技术设计了双面图像分析的马铃薯加工原料精量分选系统模型,构建了面积比、长短径、凸起检测算法,实现了马铃薯畸形、发芽、大小检测,基于 3 个颜色模型 9 个颜色分量构建了神经网络预测模型,实现了马铃薯绿皮、病斑、常色分类,预测模型准确率为 96.2%。通过分选试验,马铃薯样本分选正确率 95.92%;单薯处理耗时 3.76 s,该方法用于马铃薯加工原料精量分选可行,能够满足薯制品加工生产线前端的分选需要。后续可在其前端增加震动料斗、摩擦挡板、定位装置使马铃薯在传送带上保持一定间隔无堆放运送,并在其后端增加机械臂、收集装置以实现分选动作,从而实现全自动化在线分选。

参考文献

[1] 李小昱,陶海龙,高海龙,等.马铃薯缺陷透射和反射机器视觉

检测方法分析[J].农业机械学报,2014,45(5):191-196.

LI Xiao-yu, TAO Hai-long, GAO Hai-long, et al. Comparison of transmission and reflection imaging technologies to detect potato defects based on machine vision technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 191-196.

[2] 金瑞,李小昱,颜伊芸,等.于高光谱图像和光谱信息融合的马铃薯多指标检测方法[J].农业工程学报,2015,31(16):258-263.

JIN Rui, LI Xiao-yu, YAN Yi-yun, et al. Detection method of multi-target recognition of potato based on fusion of hyperspectral imaging and spectral information[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 258-263.

[3] 田海韬,赵军,蒲富鹏.马铃薯芽眼图像的分割与定位方法[J].浙江农业学报,2016,28(11):1947-1953.

TIAN Hai-tao, ZHAO Jun, PU Fu-peng. A method for recognizing potato's bud eye[J]. Acta Agricultural Zhejiangensis, 2016, 28(11): 1947-1953.

[4] 邓立苗,杜宏伟,徐艳,等.基于机器视觉的马铃薯智能分选方法与实现[J].中国农机化学报,2015,36(5):145-150.

DENG Li-miao, DU Hong-wei, XU Yan, et al. Implementation of intelligent potato grading method based on computer vision[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 145-150.

[5] 王红军, 熊俊涛, 黎邹邹, 等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 272-277.

WANG Hong-Jun, XIONG Jun-Tao, LI Zou-Zou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 272-277.

[6] 田芳, 彭彦昆, 魏文松, 等. 基于机器视觉的马铃薯黑心病检测机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 287-294.

TIAN Fang, PENG Yan-kun, WEI Wen-song, et al. Design and experiment of detection mechanism for potato blackheart based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 287-294.

[7] 张撇. 基于图像处理技术测量马铃薯表形特征[J]. 物理实验, 2017, 37(7): 53-55.

ZHANG Sou. Potato phenotypic characteristics based on image processing[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(7): 53-55.

[8] 向静, 何志良, 汤林越, 等. 结合计算机视觉的马铃薯外部品质检测技术[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 165-169.

XIANG Jing, HE Zhi-liang, TANG Lin-yue, et al. Research of potato quality detection technology based on computervision[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(5): 165-169.

[9] 李玉华, 李天华, 牛子孺, 等. 基于色饱和度三维几何特征的马铃薯芽眼识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 158-164.

LI Yu-hua, LI Tian-hua, NIU Zi-ru, et al. Potato bud eyes recognition based on three-dimensional geometric features of color saturation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 158-164.

(上接第 98 页)

[20] 乔宏柱, 高振江, 王军, 等. 大蒜真空脉动干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 256-263.

QIAO Hong-zhu, GAO Zhen-jiang, WANG Jun, et al. Optimization of vacuum pulsed drying process of garlic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 256-263.

[21] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETAIN H, et al. Effects of pre-freezing on the drying characteristics, structural formation and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 170-177.

[22] MOUNIR S, ALLAF T, MUJUMDAR A S, et al. Swell drying: Coupling instant controlled pressure drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality: An overview[J]. Drying Technology, 2012, 30(14): 1 508-1 531.

[23] 任爱清, 邓珊, 唐小闲, 等. 香菇脆片真空油炸—真空微波联

neering, 2018, 34(24): 158-164.

[10] 许伟栋, 赵忠盖. 基于 PCA-SVM 算法的马铃薯形状分选[J]. 控制工程, 2020, 27(2): 246-252.

XU Wei-dong, ZHAO Zhong-gai. Potato shape sorting based on PCA-SVM algorithm[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(2): 246-252.

[11] 王润涛, 李明, 龚振平. 基于双目视觉的球形果实单体采摘终端装置研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 93-100.

WANG Run-tao, LI Ming, GONG Zhen-ping. Research on spherical fruit picking terminal device based on binocular vision[J]. Food & Machinery, 2018, 34(7): 93-100.

[12] 李明, 王润涛, 赵忠媛. 马铃薯自动选种催芽系统研究[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(4): 489-494.

LI Ming, Wang Run-tao, ZHAO Zhong-yuan. Study on automatic seed selection and Germination of potato[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2019, 41(4): 489-494.

[13] 芦范. 基于改进神经网络算法的蔬菜图像识别[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 146-150.

LU Fan. Vegetable image recognition based on improved neural network algorithm[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 146-150.

[14] 邓羽翔, 罗诚, 李东亮. 基于 BP 神经网络的烟叶醇化感官质量仿真模拟[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 161-165.

DENG Yu-xiang, LUO Cheng, LI Dong-liang. Simulation of sensory quality of tobacco leaf alcoholization based on BP neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 161-165.

[15] 秦正龙, 冯长君. 基于神经网络的菠萝香气成分色谱保留值研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 30-33.

QIN Zheng-long, FENG Chang-jun. Quantitative structure retention relationship studies of aroma components from pineapple based on neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 30-33.

合干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 165-170.

REN Ai-qing, DENG Shan, TANG Xiao-xian, et al. Process optimization of vacuum-frying combined with vacuum-microwave drying in producing shiitake mushroom chips[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 165-170.

[24] JOARDDER M U H, BROWN R J, KUMAR C, et al. Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(10): 2 327-2 337.

[25] NUGRAHA B, VERBOVEN P, JANSSEN S, et al. Non-destructive porosity mapping of fruit and vegetables using X-ray CT[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2019, 150: 80-88.

[26] 张卫鹏. 茯苓干燥技术适应性及真空脉动干燥特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 30-33.

ZHANG Wei-peng. The adaptability and drying characteristics of pulsed vacuum drying technology for poria cocos[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 30-33.