

苏叶在线分选系统设计与试验

赵博 王焱 董鑫 李亚硕 姜含露 吕程序
(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对我国苏叶人工分选劳动强度大、效率低、缺乏自动分选系统的问题,设计了苏叶在线分选系统,该系统由上料单元、检测单元、传输单元、分选单元、下料单元、供气系统以及控制系统组成。首先对苏叶图像进行预处理,进而获取叶片最小外接圆及其直径信息,最后根据确定的转换系数得到苏叶尺寸。为便于苏叶分选控制,设计了苏叶尺寸输出排序策略。试验结果表明,利用该系统能够实现苏叶的快速测量与分选,单幅图像处理时间约为0.18 s,分选速度约为4片/s,系统测量总体平均绝对误差为0.157 cm,总体分选准确率为90.09%。

关键词: 苏叶; 机器视觉; 无损检测; 自动分选

中图分类号: S24; TP278 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0156-07

Design and Experiment of Online Sorting System for Perilla

ZHAO Bo WANG Ye DONG Xin LI Yashuo JIANG Hanlu LÜ Chengxu

(State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of sorting perilla being high labor intensity, low efficiency by manual work and lacking automatic sorting system in China, a high efficiency system for sorting perilla was developed. The system was composed of hardware modules and software modules. The hardware modules included feeding unit, detecting unit, transporting unit, sorting unit, blanking unit, air supply system and control system. The maximum length of perilla's blade was the most important and suitable parameter in sorting perilla according to its size. In order to carry out image processing and measure the maximum length of perilla's blade, a high efficiency algorithm was developed based on morphological features of perilla. The algorithm consisted of target extraction, minimum circumscribed circle searching and result sorting. Based on the above hardware modules and the algorithm for measuring the maximum length of perilla's blade, the software modules was developed. Experimental results showed that the processing time of single image was about 0.18 s, the sorting speed was 4 pieces per second, the total average absolute error of the proposed system to measure the maximum length of perilla's blade was about 0.157 cm and the total sorting accuracy was 90.09%. The system realized the whole process of sorting perilla from feeding to blanking automatically with minimum destruction at a high speed and high accuracy, it provided technical support for later relevant research and development of perilla sorting system.

Key words: perilla; machine vision; non-destructive detection; automatic sorting

0 引言

苏叶不仅具有一定的药用价值,还具有较高的食用价值^[1]。近些年,国内对诸如烤肉、寿司等料理的消费逐年增大,作为重要辅料的苏叶逐渐为人所知,市场不仅对苏叶的需求量快速增长,而且对其尺寸、形状、新鲜度等质量要求也越来越

高。

依据不同尺寸规格制定苏叶价格,分等销售、分级贮存,满足不同食用需求,提高苏叶产品价值及竞争力,这是目前市场重点关注且急需解决的问题。然而,目前国内尚未见相应的苏叶分选系统,主要依靠人工来完成,耗时耗力,效率极低。

机器视觉是一种快速、经济、一致、客观、无损的

检测技术,已被国内外学者广泛应用于蔬菜、水果等分选系统中^[2-15]。SOFU等^[16]利用机器视觉技术实现了对苹果尺寸、颜色、质量、缺陷的检测与分级。JARIMOPAS等^[17]利用机器视觉系统对罗望子形状、尺寸、外部缺陷进行检测与分级。ABBASGOLIPOUR等^[18]采用图像处理技术实现了对葡萄干纯度等的检测与分级。BLASCO等^[19]采用多光谱机器视觉技术显著提高了常规机器视觉系统对柑橘外部缺陷检测的准确率。杜永忠等^[20]利用机器视觉技术实现了对圣女果表面缺陷的检测与分选。文献[21-24]利用机器视觉与图像分析实现农产品分选。

本文应用机器视觉技术设计苏叶在线分选系统,以苏叶叶片最大长度为分选依据,利用苏叶叶片形态特征,设计基于最小圆的苏叶长度测量算法,以实现苏叶自动测量与分选。

1 硬件系统设计

1.1 总体结构设计

苏叶在线分选系统硬件部分主要由上料单元、检测单元、传输单元、分选单元、下料单元、供气系统以及控制系统组成。整机结构如图1所示,其中,1、2构成了上料单元主体,4~6构成了供气系统主体,7~9构成了检测单元主体,10~13构成了分选单元主体。

1.2 关键部件设计

1.2.1 上料单元

上料单元用于将待检测苏叶移送至检测单元。上料单元包括机架、上料电机、电机调速器、传动装置、辊子、上料输送带、第1执行机构。其中,第1执行机构如图2所示,可一次吸附4片苏叶,包括安装架、连接支架、无杆气缸、双杆气缸、真空吸盘。每个无杆气缸和双杆气缸上设有两个行程开关用于气缸动作控制。

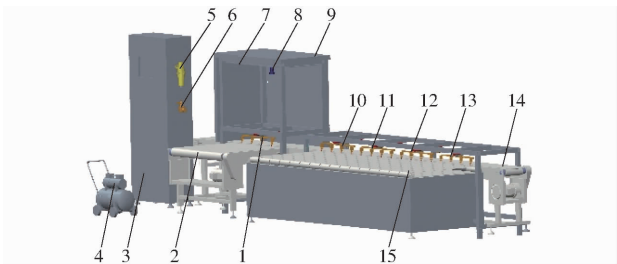


图1 苏叶分选系统整机结构图

Fig. 1 Whole structure of sorting system for perilla

1. 第1执行机构 2. 上料输送皮带机 3. 控制系统 4. 无油空气压缩机 5. 过滤减压阀 6. 精密减压阀 7. LED灯带 8. CCD相机 9. 暗箱 10. 第2执行机构 11. 第3执行机构 12. 第4执行机构 13. 第5执行机构 14. 传输单元 15. 下料单元

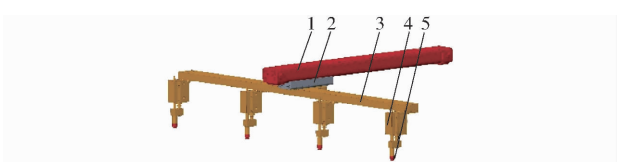


图2 第1执行机构结构图

Fig. 2 Structure of the first actuator

1. 安装架 2. 无杆气缸 3. 连接支架 4. 双杆气缸 5. 真空吸盘

1.2.2 控制系统

控制系统用于控制苏叶上料、检测、输送、分选、下料,控制系统包括工控机、控制器、输出扩展模块、继电器。控制系统的工作原理如图3所示,苏叶被摆放到上料输送带上,用于上料的执行机构将苏叶自动移送至检测单元;工控机利用检测单元结合软件系统接收信号,对图像进行采集、分析、处理并给出分选信号;S7-200分析处理信号,通过输出扩展模块、继电器控制分选单元和下料单元实现苏叶的分选和下料。

其他硬件系统功能和组成如表1所示。

1.3 系统工作流程

系统工作流程图如图4所示,具体流程如下:
①开机。②调节无油空气压缩机至0.5 MPa,调节相机光圈和焦距至能获得清晰图像,激活各驱动电

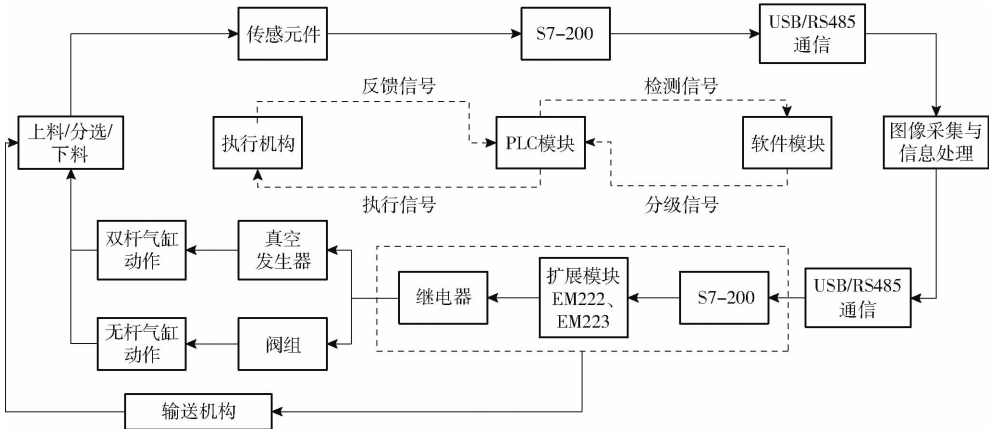


图3 控制系统工作原理图

Fig. 3 Schematic of system operation

表 1 部分硬件系统功能与组成

Tab.1 Function and component of part of hardware system

名称	功能	组成
供气系统	提供稳定气压	无油空气压缩机、过滤减压阀、精密减压阀、真空发生器、阀组
检测单元	提供苏叶检测环境	机架、LED 光源、相机安装架、CCD 相机、镜头、遮光板
传输单元	输送苏叶	机架、输送电机、电机调速器、辊子、输送带
分选单元	将不同规格苏叶移送至下料单元	机架、第 2~5 执行机构(组成和结构与第 1 执行机构相同)
下料单元	下料	机架、下料电机、电机调速器、摩擦轮、下料输送带、辊子

机,调节至合适速度。③人工上料至上料输送带,第 1 执行机构上料。④相机采集图像,工控机处理并输出分级结果。⑤控制器接收处理分选结果并控制不同分级阀组和真空发生器实现苏叶分级,即控制器首先判断分选信号中是否存在 1 级信号,若存在,

则激活第 2 级执行机构对应阀组和真空发生器状态进而控制第 2 级执行机构将苏叶移送至下料输送带,若不存在,则直接将信号移位至下一级,依此类推,最后,若检测的苏叶不属于任何级别,则视为无效目标。⑥下料。

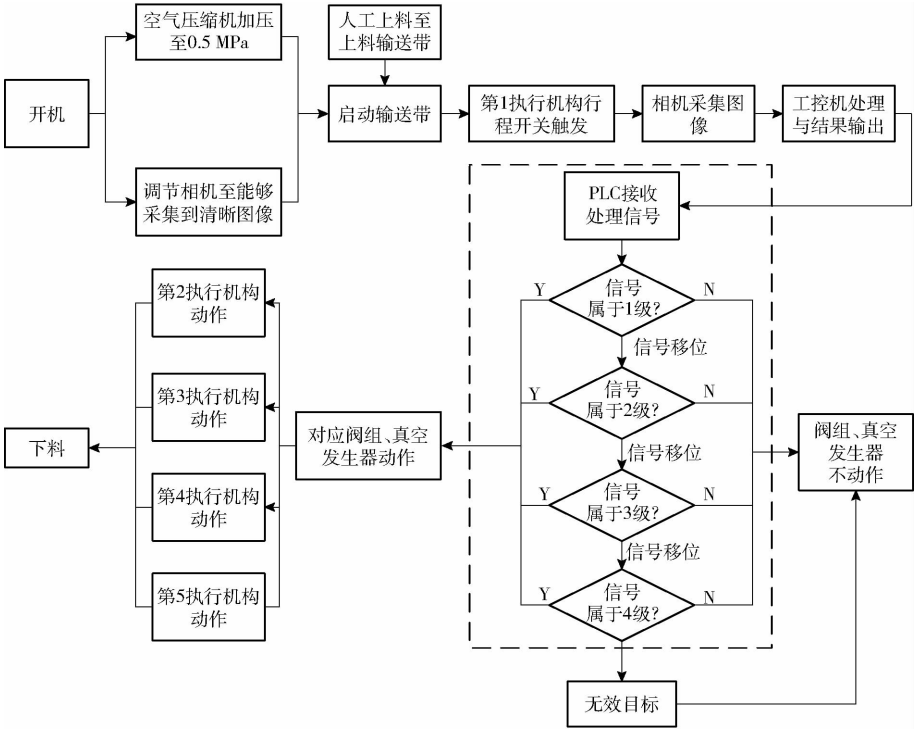


图 4 系统工作流程图

Fig.4 Working flow chart of system

2 软件系统设计

2.1 苏叶长度测量算法

由于国内在苏叶分选上尚未有相应的分选标准,因此,本文参考国外苏叶分选标准,以苏叶叶片最大长度作为苏叶尺寸分选的唯一依据。图 5 所示苏叶是本文分选的目标,观察其外形可以看出,其叶片最大长度实际为叶尖 P_A 和叶片与叶梗分离点 P_B 的距离 L_u 。因此,本文对原始图像(图 6a)依次进行灰度化、大津法阈值分割处理,获得二值图(图 6b),并对图像取反(图 6c),结合

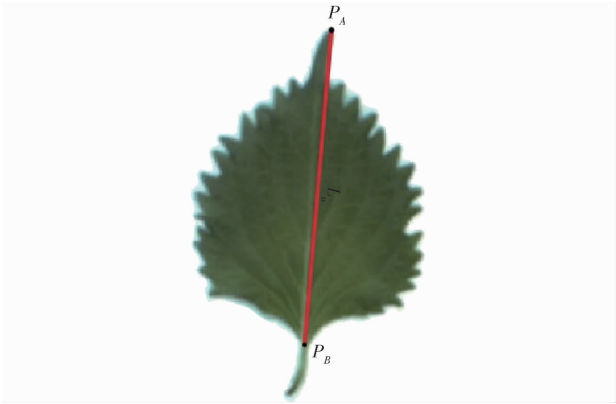


图 5 苏叶测量长度示意图

Fig.5 Schematic of length of measuring perilla

式中 $j'(x,y)$ ——图 6d 中点 (x,y) 处的像素值

$$j'(x,y)=\begin{cases} 0 & (y\leq R_{\min},y\geq R_{\max}) \\ j(x,y) & (R_{\min}<y<R_{\max}) \end{cases} \quad (1)$$

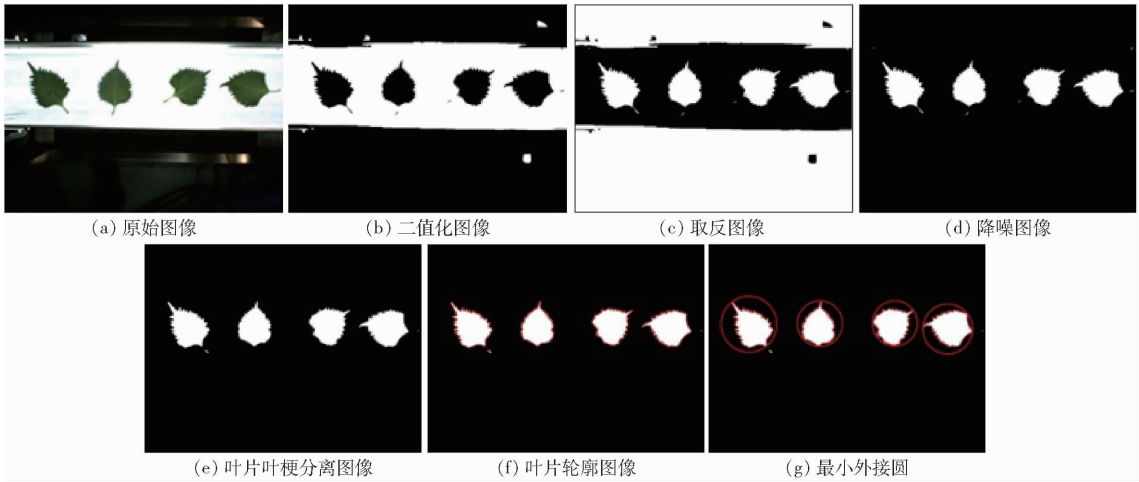


图 6 目标提取及最小外接圆获取

Fig. 6 Target extracting and minimum circumscribed circle searching

$j(x,y)$ ——图 6c 中点 (x,y) 处的像素值
 $R_{\min}, R_{\max}$ ——行上、下阈值

对取反图像进行降噪处理(图 6d),去除背景干扰。但从降噪图像可以看出,部分叶片叶梗相连,这使得 P_B 坐标难以获取,因此,对降噪图像进行形态学操作以完全分离叶片与叶梗。经试验发现,对降噪图像依次进行 1 次闭运算、2 次腐蚀、2 次膨胀处理的效果最好(图 6e)。对降噪图像进行形态学操作后,分离的叶梗虽然成了噪声,但可以看出,该类噪声面积远小于目标轮廓所包围区域面积且数量较少,因此,一种有效的方法是通过区域面积进行筛选,在滤除噪声的同时对目标进行提取(图 6f),筛选公式为

$$C_{e,i} = \begin{cases} 1 & (A_d < A_i < A_u) \\ 0 & (A_i \leq A_d, A_i \geq A_u) \end{cases} \quad (i=0,1,\cdots,N) \quad (2)$$

式中 $C_{e,i}$ ——图 6e 中第 i 个区域轮廓判定结果
 A_i ——第 i 个轮廓所包围区域面积
 A_d ——面积下限
 A_u ——面积上限
 N ——检测出的轮廓数量

其中,判定结果为 1 表明该轮廓为苏叶轮廓,为 0 表明该轮廓为非苏叶轮廓。由于苏叶姿态的不确定性,使得 P_A 、 P_B 两点的坐标随着苏叶姿态改变而改变,这使得依靠 P_A 、 P_B 坐标进行测量比较困难。对此,本文采用一种简单有效的方法,即通过获取苏叶轮廓最小外接圆(图 6g),进而获取其直径 D ,并作为 L_u 的系统测量值。后续通过试验也证明了这是一种简单、快速、有效的方法。由于通过该方法得到的系统测量值是以像素为单位的长度,对此,本文先通过计算获得了转换系数 k ,将得到的系统测量值乘以该系数 k 得到待测量长度 L_u 的系统测量结果 $L_{u,s}$,其中 k 的计算公式为

$$k = \sum_{i=1}^M \frac{L_i}{D_i} \quad (3)$$

式中 L_i ——苏叶叶片最大长度人工测量值,cm
 D_i ——苏叶叶片最大长度系统测量值,像素
 M ——苏叶数量

整个算法流程如图 7 所示。

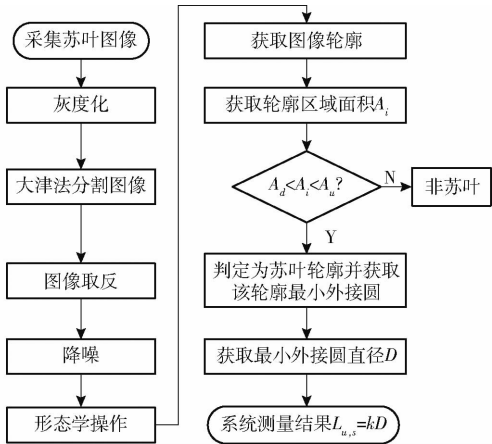


图 7 苏叶长度测量算法

Fig. 7 Algorithm for measuring length of perilla

经试验得出, $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$ 分别取 200、545 像素时降噪效果最佳,如图 6d 所示。当 A_d 取 6 000 像素, A_u 取 30 000 像素时判别结果最佳,如图 6f 所示,红线表示苏叶轮廓。

2.2 测量结果排序

由于实际获取的苏叶轮廓(图 8a)无规则排列,使得根据苏叶轮廓获取的最小外接圆无规则排列(图 8b),导致苏叶系统测量长度输出顺序较乱,使得软件系统根据苏叶系统测量长度给出的分选信号排列不规则,给后续分选控制带来一定的困难。因此,为使后续苏叶分选控制方便,在获取苏叶轮廓最小外接圆之前,对苏叶轮廓进行再排列以输出规则排列分选信号(统一采用从左到右排列顺序)。结

合所识别苏叶的最大数量将整幅图分为 4 个区域, 标识为 1、2、3、4 号,对苏叶轮廓进行再排列的公式为

$$C_{z,i} = \begin{cases} 1 & (d_b < c_{x,i} \leq d_b + d_g) \\ 2 & (d_b + d_g < c_{x,i} \leq d_b + 2d_g) \\ 3 & (d_b + 2d_g < c_{x,i} \leq d_b + 3d_g) \\ 4 & (d_b + 3d_g < c_{x,i} \leq d_b + 4d_g) \end{cases} \quad (4)$$

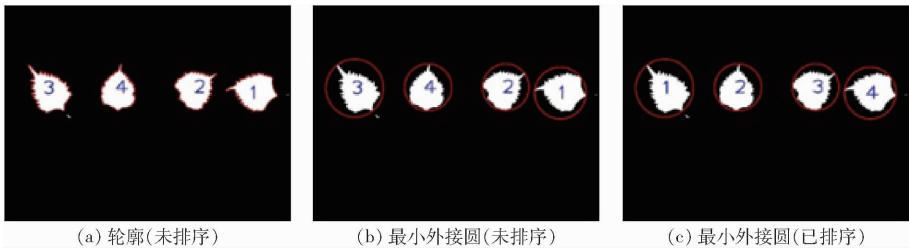


图 8 苏叶轮廓及最小外接圆(图中数字仅代表排列顺序)

Fig. 8 Contour and minimum circumscribed circle of perilla (numbers in map only represented sequence)

2.3 软件系统开发

基于上述算法,在 Windows 框架下,采用 MFC 和 OpenCV3. 4. 0 作为开发工具,设计了苏叶在线分选软件系统,主要包括控制面板、图像采集显示模块、结果展示模块、统计结果显示模块、日志生成控制模块与工作信息显示模块,软件系统界面如图 9 所示。

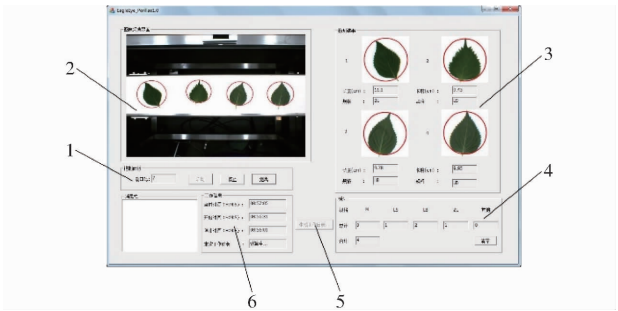


图 9 软件系统界面

Fig. 9 Software system interface

1. 控制面板 2. 图像采集显示模块 3. 结果展示模块 4. 统计结果显示模块 5. 日志生成控制模块 6. 工作信息显示模块

3 试验与结果分析

3.1 分选依据与样机

苏叶分选参考日本堀田生态农场股份有限公司相关标准,如图 10 所示,依据苏叶叶片最大长度 L_u 将苏叶分为 4 级,7 ~ 8. 5 cm 为 1 级,记为 M 规格; 8. 5 ~ 9. 5 cm 为 2 级,记为 L(小)规格;9. 5 ~ 10. 5 cm 记为 3 级,记为 L(大)规格;10. 5 ~ 12 cm 为 4 级,记为 2L 规格。

样机如图 11 所示,整机尺寸为 5 000 mm × 1 500 mm × 1 500 mm,分选速度约为 4 片/s。

3.2 图像标定

如 2. 1 节所述,在苏叶长度测量算法中,所提取

式中 $C_{z,i}$ ——第 i 片苏叶区域轮廓判定结果
 $c_{x,i}$ ——第 i 片苏叶区域轮廓中心点 x 坐标值
 d_b ——边界初始距离
 d_g ——区间间隔
经试验可得, d_b 取 30 像素, d_g 取 330 像素时, 所得效果较好,如图 8c 所示。

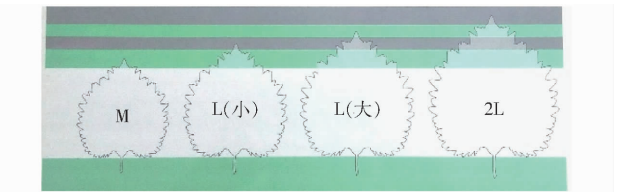


图 10 苏叶分选依据图

Fig. 10 Pursuant picture of perilla sorting



图 11 苏叶分选样机

Fig. 11 Perilla sorting machine

的直径是像素坐标下的值,因此,需要通过转换系数 k 将该像素直径转换为实际值。为此,选取苏叶 120 片,其中 100 片用于验证苏叶分选系统测量精度和分选效果,其余 20 片用于计算 k 。由于使用的相机基本无畸变, k 计算步骤为:①初始时,设置软件系统中 k 为 1。②采用游标卡尺对苏叶叶片最大长度进行测量,得到人工测量值 L_i 。③将苏叶放入系统检测单元结合软件系统对苏叶叶片最大长度进行再测量,得到系统测量值 D_i 。④利用步骤②、③所得测量信息结合式(3)重新计算 k ,得到结果为 0. 053 013 cm/像素。

3.3 长度精度试验

修改软件系统中 k 为 0.053 013 cm/像素, k 一经确定在装置不改变的情况下不需要再次修改。采用人工方式测量剩余 100 片苏叶最大长度并利用系统测量对应长度, 所得测量结果和测量误差分别如图 12、13 所示, 总体来看, 测量误差较小, 能够满足实际分选苏叶测量精度要求。

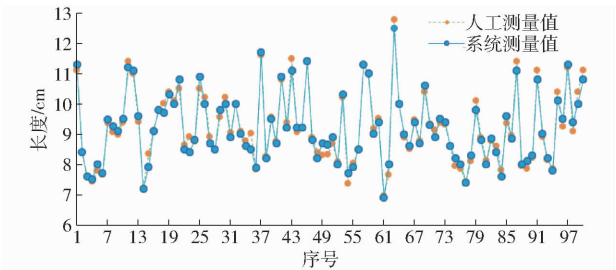


图 12 苏叶测量结果对比

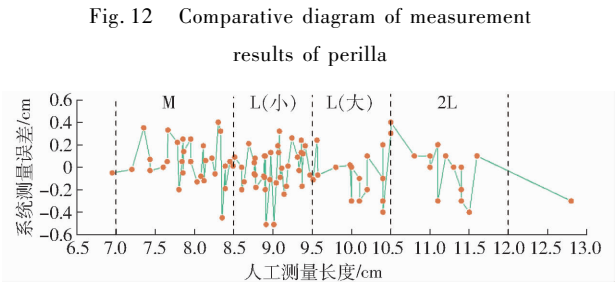


图 13 误差曲线

Fig. 13 Diagram of error

3.4 分选试验

将人工测量后的苏叶摆放在上料输送带上, 通过系统上料、检测、输送、分级、下料, 进行苏叶分选试验, 所得分选结果如图 14 所示, 其中分选准确率的计算公式为

$$P_c = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \tag{5}$$

式中 P_c ——分选准确率 N_c ——分级正确数量
 N_t ——当前检测数量

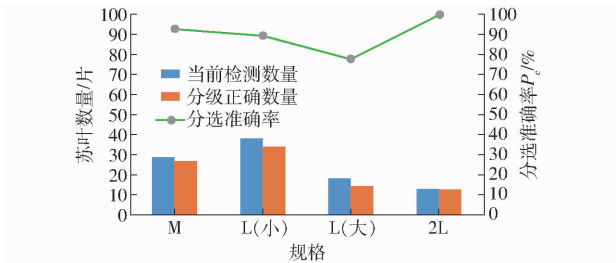


图 14 苏叶分选结果

Fig. 14 Sorting result of perilla

3.5 结果分析

经试验, 苏叶分选系统单幅图像处理时间约为 0.18 s, 规格为 M、L(小)、L(大)、2L 的苏叶对应系统测量绝对误差最小值均为 0 cm, 最大值分别为

0.450、0.510、0.400、0.400 cm, 平均绝对误差分别为 0.145、0.148、0.186、0.162 cm, 总体平均绝对误差为 0.157 cm, 对应分选准确率分别为 93.10%、89.47%、77.78%、100%, 总体分选准确率为 90.09%, 如表 2 所示。

表 2 苏叶分选统计结果

Tab.2 Sorting results of perilla

参数	M	L(小)	L(大)	2L
数量	29	38	18	13
最小绝对误差/cm	0	0	0	0
最大绝对误差/cm	0.450	0.510	0.400	0.400
平均绝对误差/cm	0.145	0.148	0.186	0.162
分选准确率/%	93.10	89.47	77.78	100
总体分选准确率/%	90.09			
总体平均绝对误差/cm	0.157			

从表 2 可以看出, 苏叶系统测量长度总体平均绝对误差较小, 但每个规格苏叶对应系统测量绝对误差较大。主要原因是, 在苏叶长度测量算法中, 为有效分离叶片叶梗, 对降噪后图像进行了多次形态学操作, 使得叶尖以及叶片与叶梗连接点被腐蚀, 导致系统测量的图像距离偏小, 但由于即使使用相同的方式对不同苏叶进行形态学操作, 其处理效果也不尽相同, 使得在系统标定过程中, 通过人工测量的苏叶叶片最大长度与其对应图像距离近似为比例关系, 由此, 使得后续测试系统性能时得到的测量结果存在一定程度上的误差。总的来说, 本文所述分选设备结合本文所述苏叶长度测量方法, 能够实现苏叶长度较为准确的测量和不同规格苏叶的快速分选, 分选准确率较高。

4 结论

(1) 设计了苏叶在线分选系统, 包括上料单元、检测单元、传输单元、分选单元、下料单元、供气系统以及控制系统, 实现了苏叶上料、检测、输送、分选、下料的全流程自动化。

(2) 提出了苏叶长度测量算法, 设计了苏叶测量结果信号反馈排序策略和苏叶在线分选软件系统, 实现了苏叶长度在线快速测量及结果实时显示、统计以及软硬模块实时通信。

(3) 以 100 片苏叶验证所设计的苏叶分选系统性能, 试验结果表明, 单幅图像处理时间约为 0.18 s, 分选速度约为 4 片/s, 在苏叶长度测量和分选情况上, 规格为 M、L(小)、L(大)、2L 的苏叶对应系统测量总体平均绝对误差为 0.157 cm, 总体分选准确率为 90.09%。

参考文献

- [1] 钟艳艳,陈连国,王琼. 中药苏叶与苏梗中黄酮含量测定[J]. 安徽农业科学,2016,44(31):112-113.
ZHONG Youyan, CHEN Lianguo, WANG Qiong. Determination on flavone content in traditional Chinese medicine *Folium perillae* and *Caulis perillae*[J]. Journal of Anhui Agricultural Science,2016,44(31):112-113. (in Chinese)
- [2] 应义斌,饶秀勤,赵匀,等. 机器视觉技术在农产品品质自动识别中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2000,16(3):4-8.
YING Yibin, RAO Xiuqin, ZHAO Yun, et al. Application of machine vision technique to automatic quality identification of agricultural products [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 4-8. (in Chinese)
- [3] 赵娜,赵平,高铁军. 机器视觉技术在我国现代农业生产中的应用研究[J]. 天津农学院学报,2015,22(2):55-58.
ZHAO Na, ZHAO Ping, GAO Yijun. Study on application of machine vision technology to modern agriculture in China [J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2015, 22(2):55-58. (in Chinese)
- [4] NARENDRA V G, HAREESH K S. Quality inspection and grading of agricultural and food products by computer vision—a review [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 2(1):43-65.
- [5] ZHANG B, HUANG W, LI J, et al. Developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: a review [J]. Food Research International,2014,62(62):326-343.
- [6] CHEN Y R, CHAO K, KIM M S. Machine vision technology for agricultural applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2-3):173-191.
- [7] BROSAN T, SUN D W. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems—a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2-3):193-213.
- [8] 段宇飞,王巧华,李小明,等. 基于凸包算法的鸡蛋尺寸形状在线视觉高通量检测方法[J]. 农业工程学报,2016,32(15):282-288.
DUAN Yufei, WANG Qiaohua, LI Xiaoming, et al. High-throughput online detection method of egg size and shape based on convex hull algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15):282-288. (in Chinese)
- [9] 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 Hongjun, XIONG Juntao, LI Zouzou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristic parameters in machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8):272-277. (in Chinese)
- [10] SABLIOV C M, BOLDOR D, KEENER K M, et al. Image processing method to determine surface area and volume of axis-symmetric agricultural products[J]. International Journal of Food Properties, 2002, 5(3):641-653.
- [11] NOURI-AHMADABADI H, OMID M, MOHTASEBI S S, et al. Design, development and evaluation of an online grading system for peeled pistachios equipped with machine vision technology and support vector machine [J]. Information Processing in Agriculture, 2017,4(4):333-341.
- [12] 魏文松,邢瑶瑶,李永玉,等. 适于餐厅与家庭的叶菜外部品质在线检测与分级系统[J]. 农业工程学报,2018,34(5):264-273.
WEI Wensong, XING Yaoyao, LI Yongyu, et al. Online detection and classification system of external quality of leaf for dining hall and family [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5):264-273. (in Chinese)
- [13] 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.
LI Long, PENG Yankun, LI Yongyu. Design and experiment on grading system for online non-destructive detection of internal and external quality of apple [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9):267-275. (in Chinese)
- [14] 王干,孙力,李雪梅,等. 基于机器视觉的脐橙采后田间分级系统设计[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2017,38(6):672-676.
WANG Gan, SUN Li, LI Xuemei, et al. Design of postharvest in-field grading system for navel orange based on machine vision [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38(6):672-676. (in Chinese)
- [15] 陈坤杰,李航,于镇伟,等. 基于机器视觉的鸡胴体质量分级方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):290-295.
CHEN Kunjie, LI Hang, YU Zhenwei, et al. Grading of chicken carcass weight based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):290-295. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170638&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.038. (in Chinese)
- [16] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C. Design of an automatic apple sorting system using machine vision [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016,127(C):395-405.
- [17] JARIMOPAS B, JAISIN N. An experimental machine vision system for sorting sweet tamarind [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(3):291-297.
- [18] ABBASGHOLIPOUR M, OMID M, KEYHANI A, et al. Sorting raisins by machine vision system [J]. Modern Applied Science, 2010, 4(2):49-60.
- [19] BLASCO J, ALEIXOS N, GÓMEZ J, et al. Citrus sorting by identification of the most common defects using multispectral computer vision[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3):384-393.

- impeller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3):515–521. (in Chinese)
- [24] WEBER A, MORSBACH C, KUGELER E, et al. Flow analysis of a high flowrate centrifugal compressor stage and comparison with test rig data[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: ASME, 2016:1–12.
- [25] 崔宝玲, 陈杰, 李晓俊, 等. 高速诱导轮离心泵内空化发展可视化实验与数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 148–155.
CUI Baoling, CHEN Jie, LI Xiaojun, et al. Experiment and numerical simulation of cavitation evolution in high speed centrifugal pump with inducer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 148–155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180417&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.017. (in Chinese)
- [26] 赵伟国, 翟利静, 夏添, 等. 离心泵叶片开槽抑制空化数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):150–157.
ZHAO Weiguo, ZHAI Lijing, XIA Tian, et al. Numerical simulation of slotted blade in centrifugal pump on cavitation suppression[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):150–157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.019. (in Chinese)
- [27] LIU Z X, PING Y, MEHRDAC Z. On the nature of tip clearance flow in subsonic centrifugal impellers[J]. Science China (Technological Sciences), 2013, 56(9):2170–2177.
- [28] YAMADA K, KIKUTA H, IWAKIRI K I, et al. An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 135(2):021023.
- [29] ZHAO H J, WANG Z H, XI G. Unsteady flow structures in the tip region for a centrifugal compressor impeller before rotating stall[J]. Science China (Technological Sciences), 2017, 60(6):924–934.
- [30] 邓向阳, 张宏武, 黄伟光. 低速轴流压气机中前后静叶对动叶顶部区域流动的影响[J]. 航空学报, 2005, 26(5):535–539.
DENG Xiangyang, ZHANG Hongwu, HUANG Weiguang. Effects of upstream and downstream stators on rotor tip flow in a low-speed axial compressor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5):535–539. (in Chinese)
- [31] DEGAMI D, SEGNER A, LEVY Y. Graphical visualization of vortical flows by means of helicity[J]. AIAA Journal, 2012, 28(8):1347–1352.
- [32] ZHAO X R, XIAO Y X, WANG Z W, et al. Numerical analysis of non-axisymmetric flow characteristic for a pump-turbine impeller at pump off-design condition[J]. Renewable Energy, 2017, 115:1075–1085.
- [33] SUN T, PETRIC-REPAR P, VOGT D M. Detached-eddy simulation applied to the tip-clearance flow in a last stage steam turbine blade[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Charlotte, Oslo: ASME, 2018:1–10.

~~~~~

(上接第 162 页)

- [20] 杜永忠, 平雪良, 何佳唯. 圣女果表面缺陷检测与分级系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1):194–199.  
DU Yongzhong, PING Xueliang, HE Jiawei. Surface defect detection and classification system for cherry tomatoes [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Suppl. 1):194–199. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s135&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s135&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.035. (in Chinese)
- [21] 邓继忠, 李山, 张建瓴, 等. 小型农产品分选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):245–250.  
DENG Jizhong, LI Shan, ZHANG Jianling, et al. Design and test of small-scale sorting machine for agricultural products [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):245–250. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150936&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150936&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.036. (in Chinese)
- [22] 王风云, 封文杰, 郑纪业, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):256–263.  
WANG Fengyun, FENG Wenjie, ZHENG Jiye, et al. Design and experiment of automatic sorting and grading system based on machine vision for white *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7):256–263. (in Chinese)
- [23] 陈艳军, 张俊雄, 李伟, 等. 基于机器视觉的苹果最大横切面直径分级方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):284–288.  
CHEN Yanjun, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Grading method of apple by maximum cross-sectional diameter based on computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):284–288. (in Chinese)
- [24] 陈红, 夏青, 左婷, 等. 破损花菇机器视觉检测技术[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):60–67.  
CHEN Hong, XIA Qing, ZUO Ting, et al. Application of machine vision in detection of broken shiitake [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):60–67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141110&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141110&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.010. (in Chinese)