

引用格式:

张万里, 丁为民, 刘瑛瓊, 仲高艳, 徐谐庆. 基于机器视觉的莲子去芯位置的定位方法[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 467-475.

ZHANG W L, DING W M, LIU Y Y, ZHONG G Y, XU X Q. Coring plumule positioning method of lotus seeds based on machine vision[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(4): 467-475.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于机器视觉的莲子去芯位置的定位方法

张万里^{1,2}, 丁为民^{1,2*}, 刘瑛瓊^{1,2}, 仲高艳^{1,2}, 徐谐庆^{1,2}

(1.南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2.江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031)

摘要:提出一种基于机器视觉的莲子去芯位置定位的方法,并搭建试验平台进行去芯验证。采集4个产地、不同尺寸的莲子,用2个相互垂直的摄像头采集凹槽内莲子图像,对图像进行裁剪和灰度处理后,通过莲子头部和尾部的灰度特征差异识别莲子朝向;对沿长轴尾部向上的莲子图像进行二值化处理,经腐蚀运算以消除边缘杂质,缩放以增大特征点的曲率,利用角点检测确定莲子去芯位置坐标后进行坐标换算,计算机械手移动距离,实现莲子去芯作业。试验表明:莲子理想去芯位置为莲子尾部凸点,莲子朝向判别成功率约97%,尾部凸点识别准确率约97%,整体识别成功率约94%,去芯成功率约93%,单颗莲子图像处理平均时间约78 ms,平均去芯时间约0.5 s。若以尾部凸点识别成功数为基数计算,则莲子去芯成功率可达98.9%。

关键词: 莲子; 去芯; 莲芯定位; 机器视觉; 图像处理

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)04-0467-09

Coring plumule positioning method of lotus seeds based on machine vision

ZHANG Wanli^{1,2}, DING Weimin^{1,2*}, LIU Yingying^{1,2}, ZHONG Gaoyan^{1,2}, XU Xieqing^{1,2}

(1.College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210031, China; 2.Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: In this paper, a coring plumule positioning method of lotus seeds is proposed based on machine vision. A test platform is built to verify the coring plumule location. The lotus seeds with different sizes from four producing areas are collected and two vertical cameras are selected as image acquisition devices to capture lotus seed images fixed in the groove. After image clipping and gray processing, the orientation of lotus seed was identified by gray feature difference between head and tail of lotus seed. After binarization of the image of lotus seed along the tail of the long axis, the image is etched to eliminate edge impurities, and scaled to increase the curvature of feature points. The corner detection algorithm is used to determine the plumule coordinates of the lotus seeds which is positioned correctly. Then calculate the moving distance of manipulator by coordinate conversion to realize the lotus seed coring operation. The results show that the ideal coring position of lotus seed is the tail bump of lotus seed. The success rate of identifying whether lotus seeds are located correctly is about 97%, the accuracy rate of identifying tail bump coordinates is about 97%, the success rate of overall identification is about 94%, and the success rate of coring is about 93%. The average processing time of single lotus seed image was about 78 ms, and the average cored time was about 0.5 s. If the number of successful identification of the tail convex points is taken as the base number, the success rate of coring from the tail bump of lotus seed is 98.9%.

Keywords: lotus seed; removing plumule; coring plumule positioning; machine vision; image processing

收稿日期: 2020-03-25

修回日期: 2020-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370701)

作者简介: 张万里(1993—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事农产品加工与机械研究, njauzhangwanli@163.com; *通信作者, 丁为民, 博士, 教授, 主要从事农机现代设计理论及方法研究, wmding@njau.edu.cn

莲子由莲壳、莲皮、莲仁与莲芯组成,食用前通常需要去除莲心^[1-4]。去芯是莲子加工中的重要环节,要求将莲芯一次性完整地莲仁中穿出,既不能让莲芯残留在莲仁中影响莲子口感,也不能对莲仁造成破损,影响品相^[5-6]。现有莲子去芯设备采用沿莲子长轴方向的外轮廓最大横截面进行定位,从外接圆的中心位置刺入捅针去芯^[7],捅针刺入方向容易偏移莲芯轴线方向,导致去芯不彻底,且莲仁损失较大,莲芯破损严重^[8]。

基于机器视觉的目标检测、空间定位与位置跟踪技术已成为农机装备智能控制领域的热点和难点^[9-13]。EDAN等^[14]通过2个黑白CCD相机获取图像,基于反射率、纹理和形状分析,经秩滤波、低阈值分割、开运算、高阈值分割等步骤进行甜瓜的识别和定位,在2个季节对2个品种的甜瓜进行了田间试验,超过85%的果实被成功检测和采摘。王侨等^[15]基于颜色特征和边缘检测对玉米种粒胚芽正反面的识别和尖端朝向的判定进行了研究,改进了图像检测算法,胚芽反面检测准确率为98%,尖端朝向检测偏差小于8°。贺橙林^[16]利用边缘检测提取轮廓特征,搭配机械手和气动控制系统,研制了一种气动采摘机器人,能够自动识别和定位果实,实现自主抓取任务。闫建伟等^[17]利用颜色特征和细化算法定位小麦胚芽鞘切割点位置,可以简单有效地对小麦胚芽鞘和种子进行图像分割,快速识别胚芽鞘及切割位置,满足胚芽鞘切割装置需求。

基于现有的莲子去芯机械^[18-22]可以实现莲子的自动上下料,并对莲子进行导正定位,笔者设计了试验平台,利用机器视觉技术,提出一种莲子去芯位置定位的方法:从2个相互垂直的视图方向采集凹槽内莲子的图像,对图像进行裁剪和灰度处理后,通过莲子头部和尾部的灰度特征差异识别莲子朝

向;对沿长轴尾部向上的莲子图像进行二值化处理,经腐蚀运算以消除边缘杂质,缩放以增大特征点的曲率后,利用角点检测算法确定其去芯位置坐标,结合视觉标定技术进行坐标换算,计算去芯机械手具体移动距离,从而控制去芯捅针,完成去芯作业。

1 莲子图像的采集

1.1 莲子去芯方法的确定

成熟的莲子呈椭球状,去壳、去皮后表面呈淡黄白色,顶端呈凸形状,棕红色,正中常有裂隙,自裂隙处可剥为两瓣,瓣呈凹槽形状,内含绿色胚芽1枚(莲芯)。按照莲芯生长方向,规定莲子外部棕红色区域为头部,另一端为尾部。尾部外侧有一凸点。调研发现,手工去芯时,从莲子尾部凸点位置刺入捅针,去芯成功率最高。通过观察莲子的结构,发现莲芯和莲仁的生长结合处在莲子尾部的外侧形成一个凸点,即莲芯轴线和莲子尾部外表面的交点。从该凸点位置刺入捅针,可以切断莲芯和莲仁的结合,同时将莲芯沿莲仁中间凹槽完整捅出,理论上去芯成功率最高。

为了进一步验证从莲子尾部凸点位置去芯方法的正确性,进行了莲子的手工去芯试验。莲子的外形尺寸不一,截面圆度较不均匀^[23],且莲子几何轴线与莲芯轴线的同轴度误差达 $0.914\ 0\ \text{mm}$ ^[24](湘莲)。将400颗湘莲莲子分成2组,分别从莲子尾部凸点去芯和偏移莲子尾部凸点约1 mm处去芯。测得莲芯底部直径为2.21~3.23 mm,平均值约为2.6 mm,因此,选用直径2.5 mm的钢针去芯,去芯效果如图1所示。去除莲芯且完好、去除莲芯但破损都被视为成功去芯;部分莲芯残留、全部莲芯残留视为去芯失败。去芯成功率如表1所示。

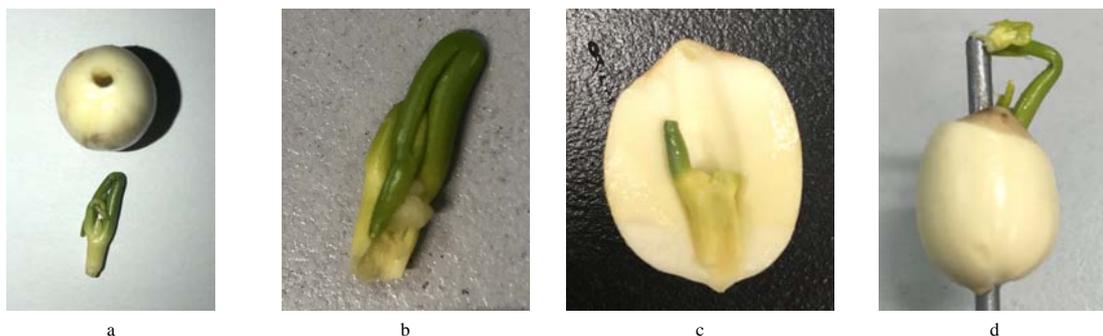


图1 莲子手工去芯效果

Fig. 1 Diagram of lotus seeds after manual coring removal test

表 1 莲子手工去芯成功率

Table 1 Success rate of manual lotus seed plumule removal test

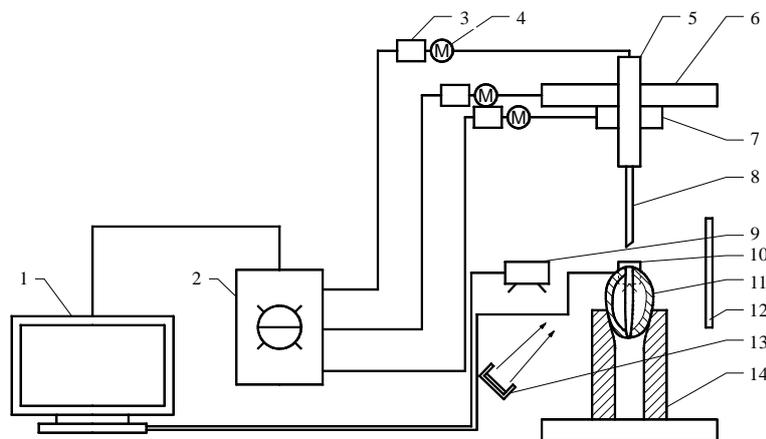
| 去芯位置 | 莲芯完好数 | 莲芯破损数 | 莲芯部分残留数 | 莲芯全部残留数 | 去芯成功率/% |
|--------------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 尾部凸点 | 180 | 19 | 1 | 0 | 99.5 |
| 偏移凸点约 1 mm 处 | 54 | 87 | 32 | 27 | 70.5 |

由图 1 和表 1 可以看出,从莲子尾部凸点位置刺入捅针,捅针轴线基本可以和莲芯轴线准确定位,捅针前端完全顶住莲芯底部,直接切断莲芯和莲仁的生长结合,将莲芯沿内部空腔顶出,去芯成功率高,莲芯和莲仁的损伤率低;而当捅针偏移凸点约 1 mm 处去芯时,捅针刺入方向偏移莲芯底部,容易将莲芯底部切开,导致仅能去除部分莲芯,或无法去除莲芯,且容易破坏内部空腔,损坏莲芯,损伤莲仁,去芯成功率低,因而莲子的理想去芯位置应是莲子尾部凸点。精准定位最佳去芯位置,即尾部凸点位置,是莲子去芯成功的关键步骤。笔者曾尝试直接从莲子的尾部图像识别凸点位置,采用基于 HSV 颜色空间的直方图自适应方法和基于 K 均值聚类方法,但由于莲子尾部凸点同尾部其他位置颜色差异小,且高度的差异也小,直接通过尾部图像识别凸点位置较为困难,2 种方法的成功率分别仅为 78%和 82%,因而采用 2 个摄像头,基于正交视图方向(X 轴和 Y 轴方向)分别识别尾部凸点坐标 X 轴相机可以得到莲子尾部凸点的图像坐标(x, z), Y 轴相机得到莲子尾部凸点图像坐标(y, z),通过坐标转换得到尾部凸点的空间位置坐标(X, Y, Z)。基于现有的莲子去芯机械^[18-22]可以实现莲子的自动上

下料,并对莲子进行导正定位,提出将莲子沿长轴固定在凹槽内,从 2 个相互垂直的视图方向分别确定尾部凸点在相应视图中的图像坐标,结合视觉标定技术,计算去芯机械手具体移动距离,从而控制去芯捅针,完成去芯作业。

1.2 莲子去芯验证试验平台的设计

按照目前可以实现的定位和去芯方式,搭建了莲子去芯验证试验平台。该平台主要由视觉系统和去芯控制系统组成,如图 2 所示。选用以 AVR 单片机作为运动控制核心的 Arduino Mega2560 开发板,通过 CH340 芯片与上位机 PC 电脑端直连,通过电脑端来传输数据文件,配合 Ramps 1.4 扩展板便于接线使用。选取分辨率为 1280 像素×960 像素的维视图像 MV-VD120SC 摄像头作为图像采集装置,2 个摄像头距离凹槽中心距离相等,分别搭配 2 个背景板和光源进行图像采集。选取 42HS4813A4CE 步进电动机及由 A4988 芯片控制的驱动器作为机械手 I 轴、II 轴及 III 轴的移动机构,分别控制去芯捅针的水平两方向移动和垂直方向移动。选用一种刀刃面呈斜面的通芯钻^[25]作为去芯捅针。



1 PC 电脑; 2 控制面板; 3 电动机驱动器; 4 步进电动机; 5 机械手 III 轴; 6 机械手 I 轴; 7 机械手 II 轴; 8 去芯捅针; 9 Y 轴摄像头; 10 X 轴摄像头; 11 莲子; 12 背景板; 13 光源; 14 定位凹槽。

图 2 莲子去芯试验平台系统的结构

Fig. 2 Structure chart of core-removal position detection and control system for lotus seeds

2 图像采集及去芯位置定位算法

2.1 图像预处理

摄像头采集的原图分辨率为 1280 像素×960 像素。为提升运算速度,取原图像第 400 列至第 880 列和第 300 行至第 650 行,对图像进行裁剪,裁剪后的分辨率为 481 像素×351 像素。为消除算法对图像色彩的依赖,减少计算量并消除色调和饱和度信息而只保留亮度信息^[26],提高识别的准确度,将图像转换为灰度图,图像预处理过程如图 3 所示。

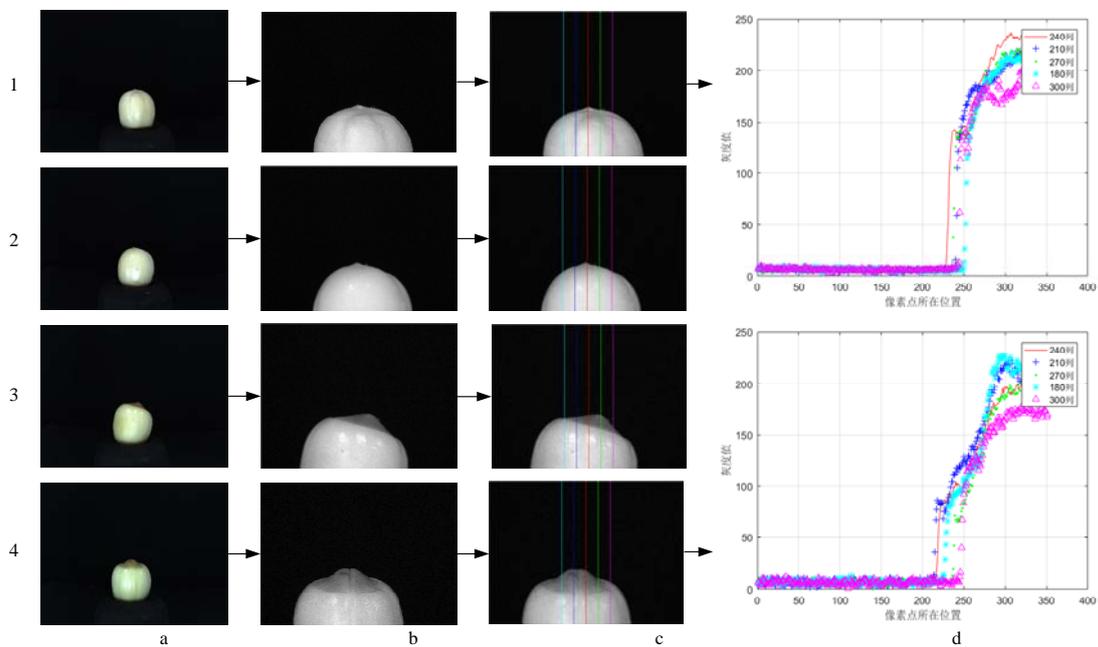
2.2 莲子朝向的判别

由于现有莲子去芯机械并不能识别莲子的头部和尾部,因此,首先需要正确识别莲子尾部的朝向。通过对所采集的莲子图像灰度数据进行统计,图像中莲子头部深色区域的灰度值为 20~130,莲子其他位置的灰度值为 120~255,背景板的灰度值为 0~20,莲子头部深色区域和莲子其他位置的灰度值存在较大差异,因而可以通过灰度值来区分头部和尾部,进而识别尾部凸点。

由于只需要检测图像中是否存在头部深色特

征,为提高检测速度,拟采用以列为单位的单线分割判断方法。由于莲子头部向上时,头部深色特征会在 X 轴或 Y 轴中至少 1 个图像内显示出来,且占比较大,因而可以通过比较满足条件的灰度值的连续情况判别莲子朝向。分别选取图像中目标列的像素点作对比,如图 3-c 所示,提取目标列的灰度信息。如图 3-d 所示,灰度值会在边界位置产生突变,结合莲子图像灰度数据分布及像素点和实际距离的比例关系,确定当连续 20 个像素点的灰度值为 20~120 时,认为检测到头部深色区域特征。

由于部分莲子的头部会稍偏,单列检测可能影响作业准确率,拟采用 5 列同时检测的方法对莲子图像进行处理,以提高识别精度。对 4 个产地的莲子的尺寸和图像进行统计分析后,选取裁剪后图像第 180、210、240、270、300 列作为目标列。作业时,比较目标列的灰度值,当其中无任何一列检测到灰度值满足条件时,判别莲子尾部朝上,继续进行下一步凸点检测和去芯操作;反之,则莲子头部向上,不进行凸点检测和去芯操作。



1 尾部向上 X 轴图像; 2 尾部向上 Y 轴图像; 3 头部向上 X 轴图像; 4 头部向上 Y 轴图像; a 采集图像; b 图像预处理; c 目标列分布; d 部分图像目标列灰度信息。

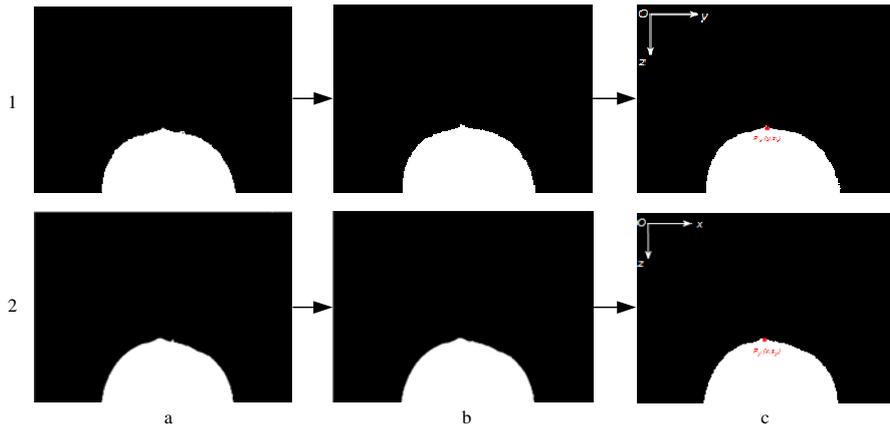
图 3 莲子朝向识别图像的处理过程

Fig. 3 Image processing of lotus seed orientation recognition

2.3 莲子尾部凸点位置检测

莲子尾部向上时, X 轴和 Y 轴图像中凸点向外突出, 有明显的角点, 可利用角点检测得出凸点坐标^[27-28]。如图 4 所示, 为更好反映图像特征, 将图像二值化^[29]。为消除边缘细小杂质影响, 使用半径为 4 的圆盘结构元素, 对图像进行腐蚀运算。将图像缩放为原图的 50%, 以增大特征点的曲率, 利于

后续检测。再利用 SURF 角点检测^[30-32], 获取图像中的角点, 选取指标最强的点作为尾部凸点在图像上的坐标。 X 轴图像和 Y 轴图像所检测的凸点坐标分别为 $P_x(y, Z_x)$ 和 $P_y(y, Z_y)$ 。综合 2 个方向的坐标, 进行凸点坐标的映射, 取 Z_x 和 Z_y 平均值为 z , 可得凸点位置在成像平面的坐标为 $P(x, y, z)$ 。



1 尾部向上 X 轴图像; 2 尾部向上 Y 轴图像; a 二值化; b 腐蚀、缩放; c 角点检测。

图 4 莲子凸点位置检测图像的处理过程

Fig. 4 Image processing of lotus seed bump position detection

2.4 凸点位置定位

作业前调整摄像头位置, 保证莲子出现在摄像头视野范围内, 测量背景板采集的视野范围宽度 L , 对应图像一行 1280 个像素宽度; 去芯插针起始位置位于摄像头视野中间位置。通过相似三角形关系求出实际宽度与像素点之间的比例关系, 如图 5 所示。检测到凸点位置信息后, 根据像素位置确定机械手 X 轴和 Y 轴移动距离。

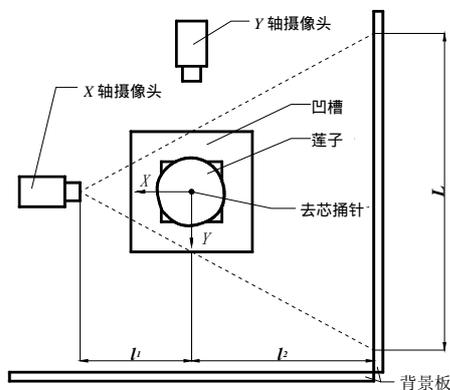


图 5 莲子凸点定位方式

Fig. 5 Sketch map of the convex point of the lotus seed location

2.5 验证试验流程

基于 Matlab R2016b 平台, 设计在 Windows 环境下运行的莲子去芯位置检测程序, 用于实现图像采集、图像分割、凸点识别和具体移动距离确定等功能。PC 机配置为 Inter Core(TM)i7-9700K、CPU3.6G Hz、内存 16GB, 基于 Windows 10 操作系统。

验证试验流程如图 6 所示。摄像头采集图像, 通过 USB 线传输图像信息。PC 机检测到莲子去芯位置信息后, 确定机械手移动距离, 传输到运动控制器; 运动控制器根据移动距离信息向 X 轴和 Y 轴步进电动机驱动器发送脉冲, 驱动 X 轴和 Y 轴步进电动机控制传输移动, 保证莲子凸点位置与去芯插针位置适宜; 运动控制器通过向 Z 轴步进电动机驱动器发送脉冲, 驱动 Z 轴步进电机控制去芯插针下降进行去芯。当去芯装置完成作业后, 检测系统开始下一次图像处理工作。

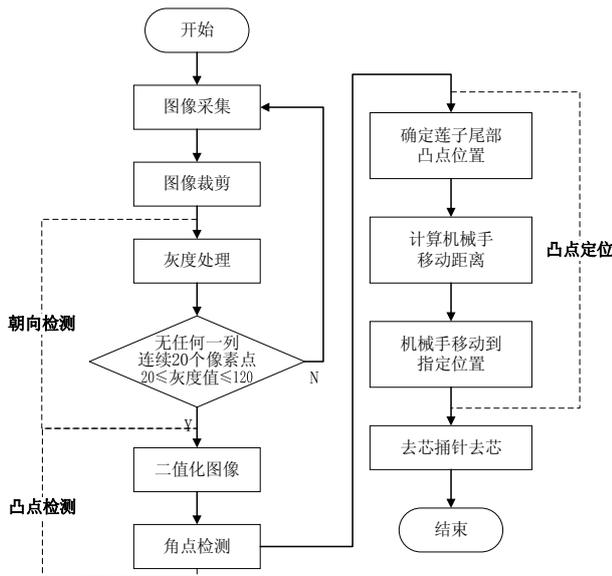


图 6 莲子去芯验证试验流程

Fig. 6 Flow chart of lotus seed plumule removal

3 去芯试验验证

为验证去芯位置定位方法的精确性，分别进行视觉系统准确率验证和去芯试验。试验采用区组设计，使用多次采样、取平均值的方法分析数据。

采集湖北仙桃、江苏南京、江西新余、湖南湘潭莲子各 200 粒，短轴长度为 10.1~17.2 mm，长轴长度为 13.2~20.1 mm。各选取其中 100 颗，进行视觉系统识别准确率试验；余下 100 颗，进行去芯试验。试验在莲子去芯验证试验平台上进行。试验时每组 25 颗莲子，剥壳去皮后备用。

进行视觉系统准确率验证试验时，将莲子随机放置于凹槽上，X 轴和 Y 轴相机分别采集莲子尾部和头部向上图像各 1 张，每组 25 张，验证莲子朝向识别的准确率；再将莲子调整为尾部向上，采集图像并验证莲子尾部凸点坐标识别的准确率。

进行去芯试验时，摄像头采集图像，通过 USB 向 PC 机传递视觉信号，PC 机将返回莲子朝向信号或凸点坐标。若返回头部向上信号，则调整莲子方向并重新采集图像；若返回凸点坐标，计算机将信号传输至运动控制器，控制 X 轴和 Y 轴电机驱动插针移动到指定位置后，控制 Z 轴电机驱动插针去芯。

视觉系统准确率验证结果如表 2 所示，去芯验证试验结果如表 3 所示，效果如图 7 所示。莲子尾部朝向的识别成功率为 96.8%，莲子尾部凸点坐标识别准确率为 97.0%，说明所采用的基于灰度特征和角点检测的算法可满足莲子去芯过程中视觉系统识别的要求，单颗莲子算法运算的平均耗时为 78.375 ms。对于部分朝向识别错误、凸点位置识别不准确的现象，可能的原因：一是由于莲子为椭球型，部分位置由于景深原因存在阴影区，影响了采集图像质量，对识别结果造成干扰，可以考虑通过调整光源加以改善；二是由于莲子尾部存在凹痕，对于部分凸点不明显的莲子，采用角点检测算法检测时可能出现偏差，检测到凹痕位置。

表 2 视觉系统对莲子朝向和尾部凸点位置的识别准确率

Table 2 Recognition accuracy of lotus seed orientation and tail bump position by vision system

| 序号 | 产地 | 正确识别朝向个数 | 朝向识别准确率/% | 正确识别尾部凸点坐标个数 | 尾部凸点坐标识别准确率/% | 算法运行平均耗时/ms |
|-----|------|----------|-----------|--------------|---------------|-------------|
| 1 | 湖北仙桃 | 25 | 100.0 | 24 | 96.0 | 72.0 |
| 2 | | 24 | 96.0 | 24 | 96.0 | 84.0 |
| 3 | | 25 | 100.0 | 25 | 100.0 | 74.0 |
| 4 | | 24 | 96.0 | 25 | 100.0 | 83.0 |
| 5 | 江苏南京 | 24 | 96.0 | 24 | 96.0 | 80.0 |
| 6 | | 22 | 88.0 | 23 | 92.0 | 83.0 |
| 7 | | 23 | 92.0 | 24 | 96.0 | 76.0 |
| 8 | | 24 | 96.0 | 24 | 96.0 | 79.0 |
| 9 | 江西新余 | 24 | 96.0 | 24 | 96.0 | 74.0 |
| 10 | | 25 | 100.0 | 24 | 96.0 | 73.0 |
| 11 | | 24 | 96.0 | 25 | 100.0 | 78.0 |
| 12 | | 24 | 96.0 | 24 | 96.0 | 83.0 |
| 13 | 湖南湘潭 | 24 | 96.0 | 25 | 100.0 | 80.0 |
| 14 | | 25 | 100.0 | 25 | 100.0 | 80.0 |
| 15 | | 25 | 100.0 | 23 | 92.0 | 78.0 |
| 16 | | 25 | 100.0 | 25 | 100.0 | 77.0 |
| 平均值 | | | 96.8 | | 97.0 | 78.4 |

去芯试验中,单颗莲子的去芯平均耗时约为 0.5 s。部分尾部凸点识别成功的莲子去芯失败,主要可能是控制系统的误差造成去芯捅针偏离指定位置。

此外,由表 3 还可以发现,若以尾部凸点识别

成功数为基数计算,即在成功识别莲子尾部凸点坐标的情况下,从莲子尾部凸点位置去芯,去芯成功率可达 98.9%。进一步验证莲子理想的去芯位置为莲子尾部凸点。

表 3 基于机器视角的莲子去芯成功率

Table 3 Success rate of lotus seed plumule removal test based on machine vision

| 序号 | 产地 | 正确识别朝向个数 | 正确识别尾部凸点坐标个数 | 成功去芯个数 | 凸点识别成功率/% | 去芯成功率/% |
|-----|------|----------|--------------|--------|-----------|---------|
| 1 | 湖北仙桃 | 25 | 24 | 24 | 96.00 | 96.00 |
| 2 | | 25 | 25 | 24 | 100.00 | 96.00 |
| 3 | | 24 | 24 | 23 | 96.00 | 92.00 |
| 4 | | 24 | 24 | 24 | 96.00 | 96.00 |
| 5 | 江苏南京 | 23 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 6 | | 24 | 22 | 22 | 88.00 | 88.00 |
| 7 | | 25 | 24 | 24 | 96.00 | 96.00 |
| 8 | | 23 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 9 | 江西新余 | 24 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 10 | | 24 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 11 | | 25 | 25 | 24 | 100.00 | 96.00 |
| 12 | | 25 | 22 | 22 | 88.00 | 88.00 |
| 13 | 湖南湘潭 | 25 | 24 | 24 | 96.00 | 96.00 |
| 14 | | 23 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 15 | | 25 | 23 | 22 | 92.00 | 88.00 |
| 16 | | 25 | 23 | 23 | 92.00 | 92.00 |
| 平均值 | | | | | 93.75 | 92.75 |

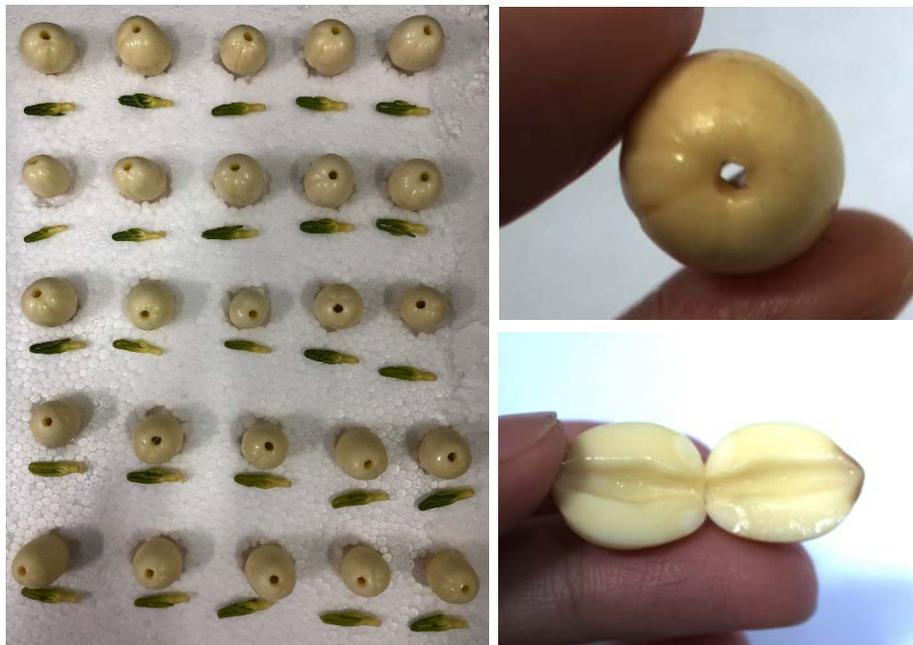


图 7 基于机器视角的莲子去芯效果

Fig.7 Test result of lotus seeds plumule removal based on machine vision

4 结论

提出了一种基于机器视觉的莲子去芯位置定位方法,即选取合适的图像采集背景和光源,利用以行和列为单位的灰度值特性识别莲子朝向,利用角点检测和坐标变换确定尾部凸点位置坐标,可快速、有效地检测莲子朝向并识别莲子尾部凸点坐标。

试验过程中平台运转平稳,工作精度可靠,能够有效完成不同产地的莲子朝向识别、尾部凸点位置坐标识别和去芯作业,克服了目前莲子去芯设备不能识别莲子头尾以及不能从莲子尾部凸点位置去芯的缺陷,去芯位置满足生产要求。试验进一步表明,莲子理想去芯位置为莲子尾部凸点。

未来,基于机器视觉的莲子去芯位置定位方法可结合现有去芯机械的滚轮对莲子进行导正,并将视觉系统同上料、定位装置结合,进行识别定位,以实现莲子自动化精准去芯作业。

参考文献:

- [1] KHAN N, SULTANA S. Anticarcinogenic effect of *Nymphaea alba* against oxidative damage, hyperproliferative response and renal carcinogenesis in Wistar rats[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2005, 271(1/2): 1-11.
- [2] 郑宝东, 郑金贵, 曾绍校. 我国主要莲子品种营养成分的分析[J]. *营养学报*, 2003, 25(2): 153-156.
ZHENG B D, ZHENG J G, ZENG S X. Analysis of the nutritional composition in chinese main lotus seed varieties [J]. *Acta Nutrica Sinica*, 2003, 25(2): 153-156.
- [3] ZENG H Y, CAI L H, CAI X L, et al. Amino acid profiles and quality from *Lotus* seed proteins[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(5): 1070-1075.
- [4] BHAT R, SRIDHAR K R. Nutritional quality evaluation of electron beam-irradiated *Lotus (Nelumbo nucifera)* seeds[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(1): 174-184.
- [5] 鲁运江. 我国子莲生产现状、问题及发展对策[J]. *蔬菜*, 2001(4): 4-6.
LU Y J. The production status, problems and development countermeasures of *Lotus* in China[J]. *Vegetable*, 2001(4): 4-6.
- [6] 裴圣华, 饶洪辉, 刘木华. 莲子通芯机研究现状与展望[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(6): 43-45.
PEI S H, RAO H H, LIU M H. Research status and prospect of machine for the coring of *Lotus* seed[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(6): 43-45.
- [7] 冯艳, 吴鹏辉, 涂晓峰. 白莲通芯机械发展研究[J]. *江西农业*, 2019(6): 122-124.
FENG Y, WU P H, TU X F. Research on the development of *Lotus* core machine[J]. *Jiangxi Agriculture*, 2019(6): 122-124.
- [8] 陈长卿, 朱建锡, 郑涛, 等. 鲜莲子机械化加工研究现状及存在的问题[J]. *农业开发与装备*, 2018(7): 103-104.
CHEN C Q, ZHU J X, ZHENG T, et al. Research status and existing problems of mechanized processing of fresh *Lotus* seed[J]. *Agricultural Development & Equipment*, 2018(7): 103-104.
- [9] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 395-405.
- [10] PANDEY R, NAIK S, MARFATIA R. Image processing and machine learning for automated fruit grading system: a technical review[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2013, 81(16): 29-39.
- [11] 杨扬, 曹其新, 盛国栋, 等. 基于机器视觉的育苗穴盘定位与检测系统[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 232-235.
YANG Y, CAI Q X, SHENG G D, et al. Plug tray localization and detection system based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 232-235.
- [12] QIAN X M, ZHAO Y S, HAN J W. Image location estimation by salient region matching[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2015, 24(11): 4348-4358.
- [13] 黄维. 计算机视觉技术在农业自动化领域的应用[J]. *农业工程*, 2018, 8(11): 25-27.
HUANG W. Application of computer vision technology in agricultural automation[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(11): 25-27.
- [14] EDAN Y, ROGOZIN D, FLASH T, et al. Robotic melon harvesting[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(6): 831-835.
- [15] 王侨, 陈兵旗, 寇春荣, 等. 基于机器视觉的玉米种粒定向定位摆放装置研制[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 19-28.
WANG Q, CHEN B Q, KOU C R, et al. Development of corn seed directional positioning machine based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(11): 19-28.
- [16] 贺橙林. 基于机器视觉的气动采摘机器人研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
HE C L. Research on the pneumatic harvesting robot

- based on machine vision[D]. Shanghai : Shanghai Jiaotong University , 2015 .
- [17] 闫建伟, 苏小东, 赵源, 等. 基于图像特征的小麦胚芽鞘识别[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(2): 326-332 .
YAN J W ,SU X D ,ZHAO Y ,et al .Wheat germ sheath recognition based on image features[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis , 2019 , 31(2) : 326-332 .
- [18] 余铭仁, 林庆福. 莲子及类似物之去芯装置 :TW20030137374[P]. 2003-12-30 .
YU M R ,LIN C F . A device for the coring of lotus seeds : TW20030137374[P]. 2003-12-30 .
- [19] 糜旺. 全自动气动莲子通芯机研究与试验[D]. 南昌 : 江西农业大学, 2016 .
MI W , Research and experiment of automatic pneumatic lotus seed core machine[D]. Nanchang : Jiangxi Agricultural University , 2016 .
- [20] 裴圣华. 鲜莲子通芯机设计与研究[D]. 南昌 : 江西农业大学, 2014 .
PEI S H ,Design and study of machine for coring of fresh Lotus seed[D]. Nanchang :Jiangxi Agricultural University , 2014 .
- [21] 马秋成, 卢安舸, 陈锴, 等. 莲子机械自动去芯自适应定心技术与样机试验[J]. 农业工程学报, 2014 , 30(21) : 17-24 .
MA Q C ,LU A G ,CHEN K ,et al .Study on self-adaptive centering method of removing core of Lotus seed and prototype test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2014 , 30(21) : 17-24 .
- [22] 王旺平, 何流, 王义权, 等. 立式多工位莲子穿心机的研制[J]. 食品与机械, 2019 , 35(7) : 107-109 .
WANG W P , HE L , WANG Y Q , et al . Design and development of a vertical multi-station Lotus core puncher[J]. Food & Machinery , 2019 , 35 (7) : 107-109 .
- [23] 刘木华, 吴彦红, 夏忠义. 莲子物理机械特性试验研究(I)[J]. 江西农业大学学报, 1999 , 21(3) : 425-428 .
LIU M H , WU Y H , XIA Z Y . Experimental studies (i) on physical and mechanical properties of Lotus seed[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis , 1999 , 21(3) : 425-428 .
- [24] 马秋成, 刘昆, 龙辉, 等. 影响鲜莲子机械去心定位精度的几何参数测量[J]. 食品与机械, 2019 , 35(3) : 76-81 .
MA Q C , LIU K , LONG H , et al . Measurement of geometric parameters affecting the positioning accuracy of fresh Lotus seeds[J]. Food & Machinery , 2019 , 35(3) : 76-81 .
- [25] 沈全军. 一种莲子通芯钻 : CN206043358U[P]. 2017-03-29 .
SHEN Q J . A lotus seed drill : CN206043358U[P]. 2017-03-29 .
- [26] 赵腾, 野口伸, 杨亮亮, 等. 基于视觉识别的小麦收获作业线快速获取方法[J]. 农业机械学报, 2016 , 47(11) : 32-37 .
ZHAO T , NOBORU N , YANG L L , et al . Fast edge detection method for wheat field based on visual recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2016 , 47(11) : 32-37 .
- [27] 赵文彬, 张艳宁. 角点检测技术综述[J]. 计算机应用研究, 2006 , 23(10) : 17-19 .
ZHAO W B , ZHANG Y N . Survey on corner detection[J]. Application Research of Computers , 2006 , 23(10) : 17-19 .
- [28] 章为川, 孔祥楠, 宋文. 图像的角点检测研究综述[J]. 电子学报, 2015 , 43(11) : 2315-2321 .
ZHANG W C , KONG X N , SONG W . Review of image corner detection algorithms[J]. Acta Electronica Sinica , 2015 , 43(11) : 2315-2321 .
- [29] 刘涛, 孙成明, 王力坚, 等. 基于图像处理技术的大田麦穗计数[J]. 农业机械学报, 2014 , 45(2) : 282-290 .
LIU T , SUN C M , WANG L J , et al . In-field wheat ear counting based on image processing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2014 , 45(2) : 282-290 .
- [30] MURILLO A C , GUERRERO J J , SAGUES C . SURF features for efficient robot localization with omnidirectional images[C]//Proceeding 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation . IEEE , Roma : 2007 : 3901-3907 .
- [31] JUAN L , GWUN O . SURF applied in panorama image stitching[C]//2010 2nd International Conference on Image Processing Theory , Tools and Applications (IPTA) , Paris , 2010 : 495-499 .
- [32] 朱奇光, 王佳, 张朋珍, 等. 基于高斯矩改进 SURF 算法的机器人定位研究[J]. 仪器仪表学报, 2015 , 36(11) : 2451-2457 .
ZHU Q G , WANG J , ZHANG P Z , et al . Research on mobile robot localization based on gaussian moment improved SURF algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2015 , 36(11) : 2451-2457 .

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立