

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.016

玉米种子实时检测分选装置设计与试验

孟繁佳 罗石 孙红 李民赞

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对我国玉米种子人工分选效率低、错分率高、缺少自动检测分选装置等问题,设计了一种玉米种子实时检测分选装置。该装置由进料单元、检测单元、分选单元和控制系统组成。下位机采用 MSP430,与上位机实时通信,并控制分选执行机构,上位机采用 Matlab 2014b 软件对玉米种子图像进行实时处理,并输出识别结果。为了便于采集玉米种子图像,设计了种子分离机构。根据霉变玉米种子与正常玉米种子表面颜色的差异,设计了一种基于 HSV 颜色空间划分的玉米种子识别算法,并提出了一种玉米种子排序策略,实现了玉米种子的精确分选。该装置对单幅图像的采集和处理时间约为 0.7 s,分选速率最高为 680 粒/min,霉变玉米种子识别准确率为 100%,装置总体分选准确率不低于 94%。该装置实现了从玉米种子进料到分选的全自动化,能够对霉变玉米种子进行实时检测和分选。

关键词: 玉米种子; 机器视觉; 霉变检测; 自动分选

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0153-07 **OSID:** 

Design and Experiment of Real-time Detection and Sorting Device for Maize Seeds

MENG Fanjia LUO Shi SUN Hong LI Minzan

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the problems of low efficiency of artificial separation, high rate of wrong separation and lack of automatic detection and separation device of mildewed corn seeds in China, a real-time detection and separation device was designed. The device consisted of a feeding unit, a detection unit, a sorting unit and a control system. The MSP430 was used to communicate by lower computer with the upper computer in real time and control the sorting actuator. The Matlab 2014b software was used by upper computer to process the corn seed image in real time and output the recognition results. In order to facilitate the image acquisition of corn seeds, a seed separation mechanism was designed. Based on the difference of surface color between mildewed corn seeds and normal corn seeds, an image algorithm for identifying mildewed corn seeds simultaneously in a single image was designed based on HSV spatial color division of image. The algorithm can realize pixel level mildewed corn seed recognition, and a sort strategy of corn seeds was proposed to achieve accurate sorting. The experiment showed that the device can realize the real-time detection and sorting of mildewed corn seeds. The acquisition and processing time of a single image was about 0.7 s, the highest sorting speed was 680 grains per minute, the recognition accuracy of mildewed corn seeds was 100%, and the overall sorting accuracy was no less than 94%. The device realized the whole process of corn from feeding to sorting automatically, and can achieve the purpose of real-time detection and sorting of moldy corn seeds. The device adopted machine vision technology to carry out non-destructive detection of corn seeds, which provided technical support for the related research and development of later corn seed grading system.

Key words: maize seeds; machine vision; mildew detection; automatic separation

收稿日期: 2020-05-19 修回日期: 2020-08-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD010100202)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020TC143)和国家自然科学基金项目(31401294)
作者简介: 孟繁佳(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事精细农业智能传感技术研究,E-mail: mengfanjia@126.com
通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

0 引言

玉米是世界上主要粮食作物之一,我国是玉米生产和消费大国,玉米产量多年位居中国粮食产量首位^[1]。玉米种子发生霉变,种植后不但不能发芽,还会造成霉菌蔓延,污染更多种子。筛除霉变种子是玉米制种生产中的必备环节,降低同一批种子带菌率,进而提高种子发芽率对保障玉米生产和产量具有重要意义^[2]。

以酶联免疫吸附法和免疫亲和层析法为代表的免疫分析法^[3-5]以及以高效液相色谱法^[6-7]和气相色谱法^[8]为代表的仪器探测理化分析法被认为是高精度检测种子真菌毒素的手段。但仪器设备价格高昂、测试过程复杂等限制了这些方法在种子生产环节的应用。由于缺少霉变种子快速筛选装置,长期以来主要依靠人工目测分选霉变玉米种子^[9]。该方法依赖人工经验,效率低且错检率高。因此,研发霉变玉米种子快速筛选装置、提高种子在线分选效率是目前玉米制种和种子贮藏急需解决的问题。

机器视觉技术已被广泛应用于农产品品质检测中^[10-13]。其中,针对作物种粒霉变检测的研究取得了较大的进展^[14-17]。褚璇等^[18]基于黄曲霉毒素在紫外光照射下发出黄绿色荧光的特性,利用图像处理技术实现了对含黄曲霉毒素玉米种粒的检测。张楠楠等^[19]基于图像 HSV 空间的 *H* 分量及 *V* 分量,设计了一种玉米种粒霉变程度分级方法。赵炎等^[20]基于机器视觉技术发现了霉变玉米真菌毒素含量与图像 HSI 空间分量之间的正负相关性。王侨^[21]基于机器视觉技术分析了玉米种粒 RGB 颜色特征,确定了霉变玉米的检测指标。文献[22-24]利用机器视觉技术实现了农产品分级与分选,其中苏叶分选准确率为 90.09%,圣女果分级准确率为 98.4%,苹果分拣准确率为 73%~96%。目前,将利用机器视觉技术检测霉变玉米种子的研究成果运用于实际生产线的研究鲜见报道。

本文利用机器视觉技术设计一种玉米种子实时检测分选装置。基于图像 HSV 空间颜色划分提出以颜色像素占比为判定阈值的霉变玉米种子识别算法,设计种子逐粒分离机构,将玉米种子单粒化,以便于玉米种子排序与分选。

1 硬件系统设计

1.1 整机结构

霉变玉米种子实时检测分选装置硬件部分主要由进料单元、检测单元、分选单元及控制系统组成。装置整机结构如图 1 所示,其中,1~4 构成装置进

料单元主体,5、6 构成装置检测单元主体,7~10 及 12、14 构成装置分选单元主体。

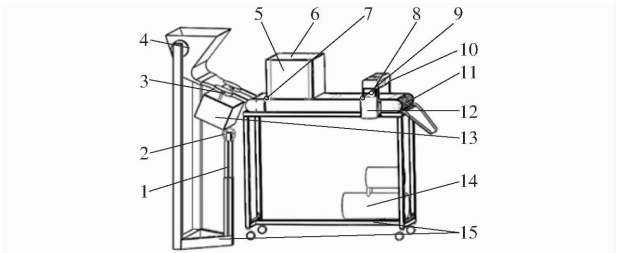


图 1 装置整机结构图

Fig.1 Complete machine structure

1. 伸缩杆 2. 传动环 3. 种子分离盘 4. 进料漏斗 5. 霉变种子检测箱 6. 相机固定位 7. 光电传感器 1 8. 光电传感器 2 9. 光电传感器 3 10. 分选机构 11. 电动辊筒 12. 霉变种子收集盒 13. 控制单元 14. 空气压缩机 15. 机架

1.2 关键部件设计

1.2.1 进料单元

进料单元将玉米种子逐粒分离至检测单元。进料单元包括机架、进料漏斗、伸缩杆、传动环、种子逐粒分离机构。其中,种子逐粒分离机构如图 2 所示,可实现玉米种子单粒化,包括种子分离盘、二级齿轮结构、电源、传动轴、直流无刷电机、电机驱动及微控单元、轴承座。

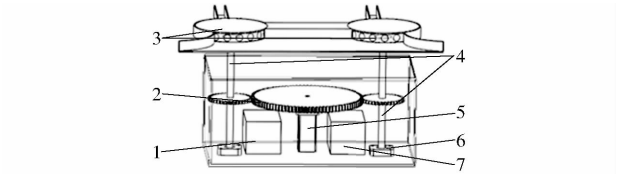


图 2 种子逐粒分离机构图

Fig.2 Seed separation mechanism diagram

1. 电源 2. 二级齿轮结构 3. 种子分离盘 4. 传动轴 5. 直流无刷电机 6. 轴承座 7. 电机驱动及微控单元

1.2.2 分选单元

分选单元用于对霉变玉米种子进行分选剔除。分选单元包括机架、电磁阀、导管支架、挡光板、PU 气管、空气压缩机。分选单元结构如图 3 所示,其中挡光板用于防止分选单元机架两侧光电传感器产生对射干扰。2 个电磁阀组成 3 种工作气路,分别为待机、左侧剔除、右侧剔除。

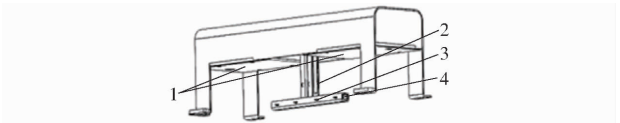


图 3 霉变玉米种子分选单元结构图

Fig.3 Sorting unit structure of mildew maize seeds

1. 电磁阀 2. 挡光板 3. 导管支架 4. PU 气管

1.2.3 控制系统

控制系统用于控制玉米种子进料、检测、排序、

分选。控制系统包括开关电源、电磁阀、光源、通信与控制模块、计算机、工业相机。控制系统框图如图4所示。通信与控制模块由MSP430单片机、光电传感器、继电器组成,负责接收光电传感器信号、控制继电器及与计算机实现双向通信。

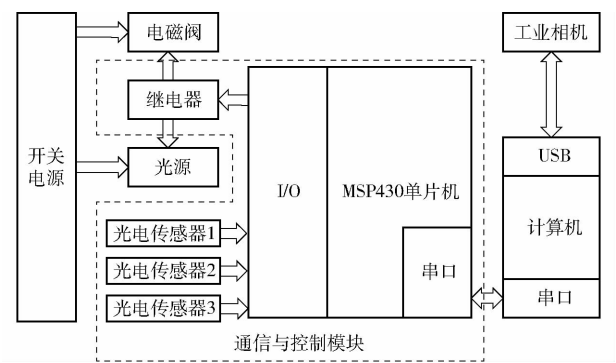


图4 控制系统框图

Fig. 4 Control system block diagram

1.2.4 装置工作参数

电动辊筒的工作电压为24 V DC,功率为200 W,运动速度为1.5~15 m/min;直动式电磁阀工作电压为24 V DC,功率为5 W,最高频率为5 Hz;继电器模块工作电压为5 V,高电平触发;相机分辨率设置为1 280像素×768像素,帧率为60 f/s;光源工作电压为24 V DC,功率为60 W,色温3 000 K;计算机处理器主频2.71 GHz,内存8 GB,Windows10操作系统。

1.3 玉米种子实时检测分选装置工作流程

霉变玉米种子实时检测装置工作流程图如图5

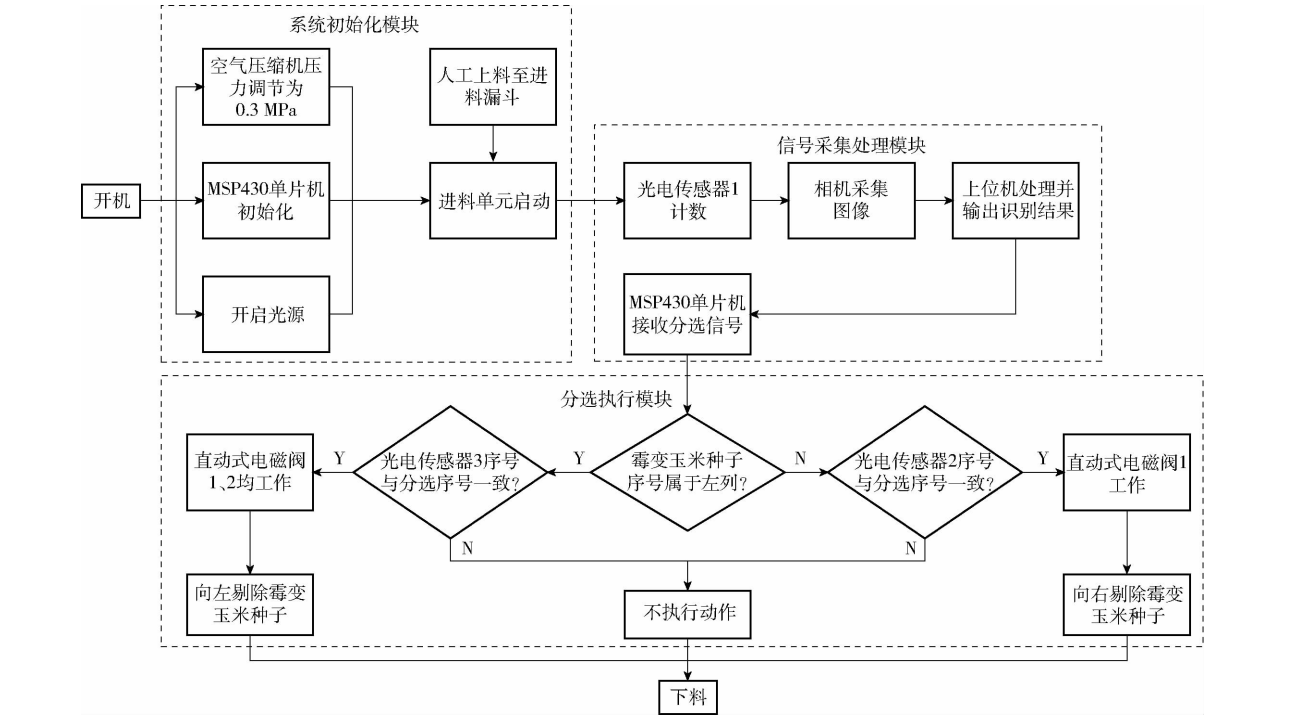


图5 装置工作流程图

Fig. 5 Working flow chart of device

所示。具体流程如下:①开机。②MSP430单片机初始化,开启光源,调节空气压缩机至0.3 MPa,开启摄像头,自动对焦至获取清晰图像。③人工上料至进料漏斗,由进料单元将玉米种子分为等间距的两列,进入检测单元。光电传感器1对玉米种子进行计数。④相机采集图像,基于Matlab 2014b搭建的上位机处理并输出识别结果。⑤MSP430单片机接收分选信号,并控制直动式电磁阀,控制气路工作状态,实现霉变玉米种子剔除。即MSP430单片机对比光电传感器2、3计数序号与分选信号,若相同,则激活执行机构对应工作状态,若不相同,则视为正常种子。⑥下料。

2 软件系统设计

2.1 单幅图像多粒霉变玉米种子识别算法

以霉变玉米种子与正常玉米种子颜色特征的差异作为霉变玉米种子识别算法的设计依据,对玉米种子图像像素点进行颜色划分并统计不同颜色的像素数占图像像素数百分比 P_i ,最后设定阈值 P_i 判定霉变玉米种子,算法流程如图6所示。

对位于检测单元的玉米种子原始图像(图7)进行霉变玉米种子识别时发现,单幅图像多粒玉米种子霉变识别的关键点是单粒玉米种子图像提取及单粒玉米种子像素颜色分布统计。因此,本文对原始图像(图7)进行感兴趣区域提取(图8a),并利用大津法^[25]进行阈值分割(图8b),然后设置形态学结构进行开闭操作,获得初步降噪图像(图8c),从图

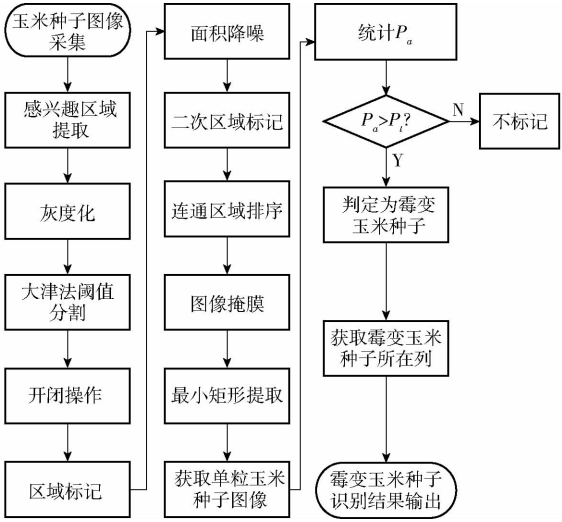


图 6 单幅图像多粒霉变玉米种子识别算法流程图

Fig. 6 Multiple mildew maize seeds identification algorithm flowchart in single image

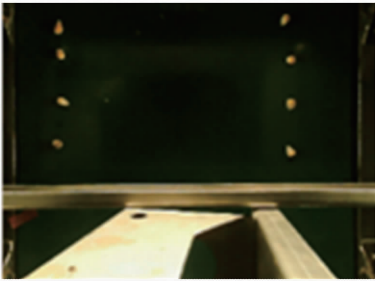


图 7 原始图像
Fig. 7 Original image

中可以看出,部分区域仍然存在噪声,对分离玉米种子背景形成了一定障碍。但是,可以发现噪声面积远小于玉米种子面积。在此基础上对初步降噪图像进行基于连通域的区域标记,并对区域面积进行筛选,筛选公式为

$$g'_{c,i} = \begin{cases} 0 & (A_{c,i} \leq A_t) \\ g_{c,i} & (A_{c,i} > A_t) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中 $g'_{c,i}$ ——降噪后区域 i 的灰度
 $g_{c,i}$ ——降噪前区域 i 的灰度
 $A_{c,i}$ ——第 i 个区域的面积
 A_t ——面积阈值
 N ——连通域数量

经过筛选将噪声灰度置 0,同时将面积降噪结果作为掩膜位图,将感兴趣区域作为掩膜原图进行

图像掩膜,达到玉米种子背景分离的目的(图 8d)。掩膜公式为

$$\begin{cases} i_{mg'a,R} = i_{mga,R}(i,j) \cdot S_{eg}(i,j) \\ i_{mg'a,G} = i_{mga,G}(i,j) \cdot S_{eg}(i,j) \\ i_{mg'a,B} = i_{mga,B}(i,j) \cdot S_{eg}(i,j) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$S_{eg}(i,j) = \begin{cases} 0 & (g_{mask}(i,j) = 0) \\ 1 & (g_{mask}(i,j) = 255) \end{cases} \quad (3)$$

式中 i,j ——掩膜图像坐标值
 $S_{eg}(i,j)$ ——掩膜标志位
 $g_{mask}(i,j)$ ——掩膜位图灰度
 $i_{mga,R}(i,j)$ ——感兴趣区域 R 通道灰度
 $i_{mga,G}(i,j)$ ——感兴趣区域 G 通道灰度
 $i_{mga,B}(i,j)$ ——感兴趣区域 B 通道灰度
 $i_{mg'a,R}$ 、 $i_{mg'a,G}$ 、 $i_{mg'a,B}$ ——掩膜后 R 、 G 、 B 三通道分量
 $\cdot$ ——图像位与运算符

对掩膜结果进行二次标记,对每个种子区域进行标记赋值。获取每个连通域的最小外接矩形,并将每个外接矩形区域保存为单幅图像(图 9),然后对单粒种子图像进行二值化并进行腐蚀膨胀消除种子内部孔洞,结合

$$S(x,y) = \begin{cases} 0 & (g(x,y) = 255) \\ 1 & (g(x,y) = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 x,y ——单粒玉米种子图像像素坐标
 $S(x,y)$ ——单粒玉米种子图像任一点 (x,y) 处标记值
 $g(x,y)$ ——单粒玉米种子图像任一点 (x,y) 处灰度

对单粒玉米种子图像背景像素进行标记,在统计种子图像像素颜色分布时,对背景像素不进行统计。

霉变玉米种子与正常玉米种子在系统中的对比图像如图 10 所示,表面颜色存在明显差异。

由于图像采集环境为封闭环境,采用光源为色温 3 000 K 的暖色 LED 光源,显色指数接近 90(接近日光显色指数),且在进行颜色划分时,需要综合参考像素点的 H 、 S 、 V 值,所以对单粒玉米种子图像进行像素颜色统计时选用经验化颜色空间分量表进行 HSV 空间颜色划分,如表 1 所示。

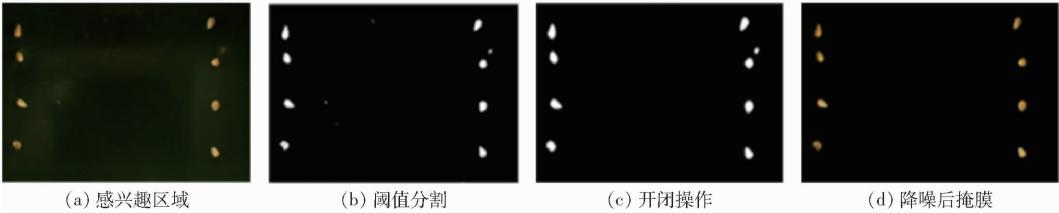


图 8 玉米种子背景分离结果

Fig. 8 Maize seeds segmentation results from background

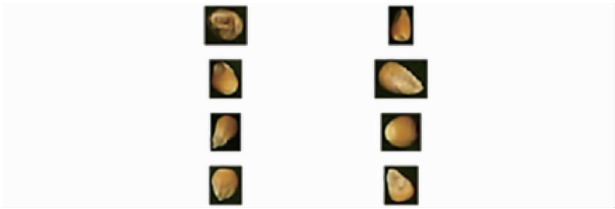


图 9 单粒玉米种子分离结果

Fig. 9 Segmentation results of single corn seed

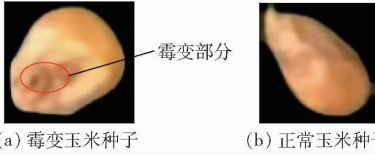


图 10 玉米种子图像对比

Fig. 10 Comparison diagrams of corn seeds

表 1 HSV 颜色空间分量范围

Tab. 1 Component range of HSV color space

颜色分量	黑	灰	白	红	橙	黄	绿	青	蓝	紫
$H_{\min}$	0	0	0	0	156	11	26	35	78	100
$H_{\max}$	180	180	180	10	180	25	34	77	99	124
$S_{\min}$	0	0	0	43	43	43	43	43	43	43
$S_{\max}$	255	43	30	255	255	255	255	255	255	255
$V_{\min}$	0	46	221	46	46	46	46	46	46	46
$V_{\max}$	46	220	255	255	255	255	255	255	255	255

根据玉米种子图像的颜色像素统计可知,白色、橙色及黄色的像素数并不具备区分性,如图 11 所示。所以霉变特征颜色不包含上述分类中的白、橙、黄 3 种颜色,最终确定霉变特征颜色为黑、灰、红、绿、青、蓝、紫 7 种颜色。

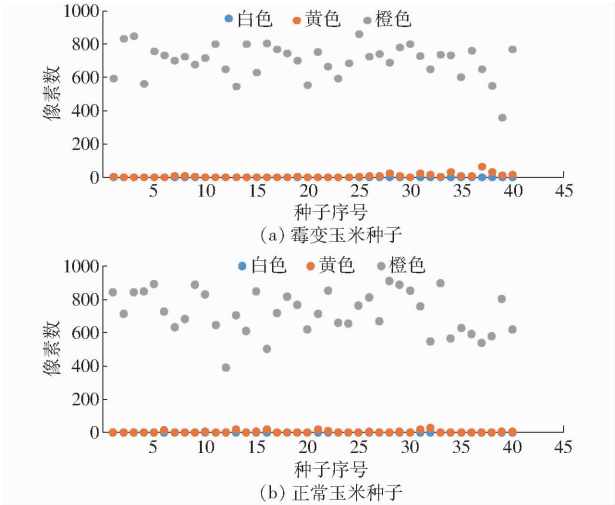


图 11 颜色像素统计对比

Fig. 11 Contrast of different color pixel statistics

对特征颜色像素进行统计,统计公式为

$$p_a(i) = \frac{P_{ixf,sum}(i)}{P_{ix,sum}(i)} \times 100\% \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (5)$$

式中 i ——玉米种子序号

$P_{ixf,sum}(i)$ ——第 i 个玉米种子霉变特征颜色

像素总数

$P_{ix,sum}(i)$ ——第 i 个单粒玉米种子图像像素总数

$p_a(i)$ ——第 i 个单粒玉米种子图像霉变特征颜色像素百分比

设定阈值为 $P_t, p_a(i)$ 高于该阈值时判定为霉变玉米种子。

经试验验证得出感兴趣区域图像坐标原点为原始图像坐标点(100,0),长 800 像素,宽 500 像素时,区域提取效果最佳, A_t 取 200 像素时,降噪效果最佳。 P_t 取 1% 时,霉变玉米种子识别准确率最高。

2.2 玉米种子排序策略

上位机对采集到的玉米种子图像进行霉变识别,由下位机执行霉变玉米种子分选。本文基于识别算法提出了一种玉米种子排序策略,使下位机能够正确识别上位机发送的分选信号,实现实时精确分选。

试验中发现,单幅图像中同一列种子的排序并非按照原始图像(图 7)的空间顺序进行区域标记。区域标记算法是从图像坐标原点自上往下、自左向右对连通域进行区域标记,由于玉米种子外形的不规则性,单列种子标记值并不符合其空间位置。为此,根据其中心坐标值在掩膜处理后对单列种子进行区域再赋值,得到符合空间顺序的图像标记序号。

图像标记序号作为分选信号传输至单片机后,需转换成为分选序号

$$\begin{cases} s_1 = S_i + 4t & (1 \leq S_i \leq 4) \\ s_2 = S_i - 4 + 4t & (4 < S_i \leq 8) \end{cases} \quad (6)$$

式中 s_1 ——左列分选序号

s_2 ——右列分选序号

S_i ——图像标记序号

t ——图像采集次数

t 由光电传感器 1 计数值决定,计数值能够整除 4 (即检测单元存在 8 粒未被检测的种子)则进行图像采集。光电传感器 2 及光电传感器 3 计数值为两列玉米种子实时序号。

3 验证试验与讨论

为验证装置稳定性与可靠性,对样机进行了试验,装置样机如图 12 所示。2019 年 12 月 10 日装置搭建完成,并进行了系统调试与试验测试。试验样品从大自然金果种业购买,样品为无包衣剂试验用郑单 958 玉米种子,购得的试验用种表面均无霉变特征。选取 100 粒正常玉米种子,于恒温 28℃ 放置于马铃薯葡萄糖琼脂培养基中,进行霉变处理,3 d 后去除覆盖于玉米种子表面的菌丝,干燥处理后

得到霉变玉米种子。试验针对霉变玉米种子识别算法的可靠性及准确率进行测试。



图 12 霉变玉米种子实时检测分选样机
Fig. 12 Detection and sorting device for mildew corn seeds

3.1 霉变玉米种子识别算法验证试验

以 2019 年 12 月 20 日的试验为例进行分析,分别选取郑单 958 玉米品种的正常玉米种子与培养所得的霉变玉米种子各 40 粒,采用手动进料方式,在表 2 的工作状态 1 下进行试验。算法验证试验结果如图 13 所示。

表 2 装置分选结果
Tab.2 Device separation results

工作 状态	传送带 速度/ (m·min ⁻¹)	霉变玉 米种子 成功分 选数 量/粒	正常玉 米种子 错误分 选数 量/粒	装置 分选 准确 率/%	装置分选 速率/ (粒·min ⁻¹)	人工分选 速率/ (粒·min ⁻¹)
1	2	20	4	96	116	176
2	6	20	3	97	354	176
3	9	20	4	96	514	176
4	12	19	5	94	680	176

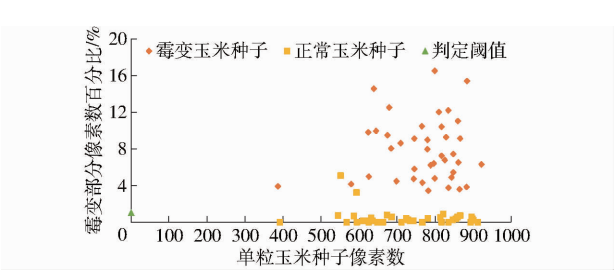


图 13 霉变玉米种子识别算法验证试验结果
Fig. 13 Results of algorithm verification

通过图 13 可以看出, $p_a(i)$ 阈值设定为 1% 时,霉变玉米种子识别准确率为 100%,正常玉米种子识别准确率为 95%。试验中出现误检测是由于检测箱光源为环形放置,光源从侧面照射玉米种子,若个别种子胚面凹陷过深则采集的种子图像存在黑色阴影,被误识别为霉变特征,改进光源放置方式后该情况得到改善。

3.2 装置分选试验

以 2019 年 1 月 10 日的试验为例,选取郑单 958

玉米品种的正常玉米种子 80 粒与霉变玉米种子 20 粒。为了验证装置在不同速度下的分选准确率及可靠性,采用手动进料方式,在不同传送带速度下进行装置分选试验,并与霉变玉米种子人工分选进行对比(由于分选样品较少,假定人工分选准确率为 100%)。

装置分选准确率 A_c 计算公式为

$$A_c = \frac{80 + M - L}{100} \times 100\%$$
 (7)

式中 M ——霉变种子正确分选数量,粒
 L ——正常种子错误分选数量,粒

通过表 2 可以看出,装置能够成功分选霉变玉米种子,且装置分选准确率最低为 94%,最高分选速率为 680 粒/min。试验表明,相较于人工分选,准确率略有降低,分选效率得到了极大的提升。总体来看,本文设计的分选装置能够实现对霉变玉米种子的实时分选,分选效率远高于人工分选且准确率较高。

3.3 讨论

试验主要针对霉变玉米种子识别算法的可靠性及分选装置分选效率及准确率进行验证,试验中发现装置分选效率可从以下两方面进行改进:

- (1)上位机图像处理程序采集图像需 200 ms 左右,处理单幅图像需要约 500 ms,试验测得玉米种子最小间距为 0.03 m,图像感兴趣区域长度为 0.15 m,则允许传送带最大速度为 14 m/min。理论上可以通过提高图像处理速度来加快传送带速度。
- (2)玉米种子之间的最小间距由光电传感器的感应范围决定。本装置使用的光电传感器是以检测到玉米种子最低点为目的,光电传感器的信号接收端接收信号范围较大,为避免误排序,单列种子之间需要存在最小间距。可以通过优化光电传感器来减小单列种子之间最小间距,增加单幅图像处理种子个数。

4 结论

- (1)在硬件系统中,设计了装置的机械结构及控制系统,解决了玉米种子单粒化及自动输送、分选问题。
- (2)在软件系统中,提出了基于机器视觉的霉变玉米种子识别算法和玉米种子排序策略,通过软硬件模块的实时通信,实现了玉米种子实时检测及玉米种子准确排序。
- (3)试验表明,该装置对单幅图像的采集及处理时间约为 0.7 s,分选速率最高为 680 粒/min,总体分选准确率不低于 94%。

参 考 文 献

- [1] 付恭华. 中国粮食生产的多维成本研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
FU Gonghua. Study on the multi-dimensional costs of food production in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [2] 王超鹏. 基于机器视觉与光谱成像技术的玉米种子品质检测与分选[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Chaopeng. Inspection and classification for the quality of maize seeds based on machine vision and spectral imaging technology[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [3] 张西亚. 玉米中四种真菌毒素的免疫分析检测技术研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
ZHANG Xiya. Immunoassays for the detection of four mycotoxins in maize[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [4] 熊挺, 蒋蔚, 韩阳瑞, 等. 家禽饲料中玉米赤霉烯酮化学发光酶联免疫分析方法的建立[J]. 畜牧与兽医, 2018, 50(2): 122–130.
XIONG Ting, JIANG Wei, HAN Yangrui, et al. Development of chemiluminescence enzyme immunoassays for determining zearalenone in poultry feed[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2018, 50(2): 122–130. (in Chinese)
- [5] 刘师文, 何庆华, 邹龙, 等. 谷物中伏马菌素 B₁ 酶联免疫分析法的建立[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 350–354.
LIU Shiwen, HE Qinghua, ZOU Long, et al. Development of an ELISA method for determining Fumonisin B₁ in cereals[J]. Food Science, 2010, 31(18): 350–354. (in Chinese)
- [6] 陈晋莹, 刘鹏, 王小庆, 等. 高效液相色谱法测定玉米中黄曲霉毒素 B₁ 含量的不确定度评价[J]. 粮食储藏, 2019, 48(3): 47–50.
CHEN Jinying, LIU Peng, WANG Xiaoqing, et al. Evaluation of uncertainty in determination of Aflatoxin B₁ in maize by high performance liquid chromatography[J]. Grain Storage, 2019, 48(3): 47–50. (in Chinese)
- [7] 盛林霞, 付豪, 吴艺影, 等. 粮食中呕吐毒素检测方法的研究进展[J]. 粮食储藏, 2018, 47(1): 32–36.
SHENG Linxia, FU Hao, WU Yiyi, et al. Research progress on determination of don in grain industry[J]. Grain Storage, 2018, 47(1): 32–36. (in Chinese)
- [8] 张正炜, 成玮, 沈慧梅, 等. 小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)毒素的气相色谱法检测及毒素污染去除分析[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(4): 33–39.
ZHANG Zhengwei, CHENG Wei, SHEN Huimei, et al. Determination of Deoxynivalenol (DON) Toxin in wheat flour by gas chromatography and analysis of toxin pollution removal[J]. Pesticide Science and Administration, 2018, 39(4): 33–39. (in Chinese)
- [9] 张楠楠. 基于嵌入式系统的粮食霉变检测装置研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
ZHANG Nannan. Research on the moldy grain detection device based on the embedded system[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] 展慧. 基于多源信息融合技术的板栗分级检测方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
ZHAN Hui. Detection of chestnut classification based on multi-source information fusion technique[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [11] 张帆, 李绍明, 刘哲, 等. 基于机器视觉的玉米异常果穗筛分方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 45–49.
ZHANG Fan, LI Shaoming, LIU Zhe, et al. Screening method of abnormal corn ears based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 45–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.008. (in Chinese)
- [12] MOMIN M A, YAMAMOTO K, MIYAMOTO M, et al. Machine vision based soybean quality evaluation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 452–460.
- [13] 王富春, 李军, 张润浩, 等. 基于计算机视觉的苹果霉心病病变程度测量方法[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 189–193.
WANG Fuchun, LI Jun, ZHANG Runhao, et al. Measurement of the degree of apple mould core disease based on computer vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 189–193. (in Chinese)
- [14] 王侨, 陈兵旗, 朱德利, 等. 基于机器视觉的定向播种用玉米种粒精选装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 27–37.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, ZHU Deli, et al. Machine vision-based selection machine of corn seed used for directional seeding[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 27–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.004. (in Chinese)
- [15] 潘磊庆, 王振杰, 孙柯, 等. 基于计算机视觉的稻谷霉变程度检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 272–280.
PAN Leiqing, WANG Zhenjie, SUN Ke, et al. Detection of paddy mildew degree based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 272–280. (in Chinese)
- [16] 王金英, 董礼. 基于计算机视觉的花生霉变程度检测[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 223–226.
WANG Jinying, DONG Li. Computer vision-based detection of mildew in peanut[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 223–226. (in Chinese)
- [17] 陈兵旗, 高振江, 宋同珍, 等. 棉种图像精选方案与算法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 167–171.
CHEN Bingqi, GAO Zhenjiang, SONG Tongzhen, et al. Scheme and algorithm of cotton seed selection based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 167–171. (in Chinese)

- 47(3):263–271.
- WANG Pengxin, SUN Huitao, WANG Lei, et al. Winter wheat yield estimation based on four-dimensional variational assimilation method and remotely sensed vegetation temperature condition index[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 263–271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190337&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.037. (in Chinese)
- [25] ARULAMPALAM S, MASKELL S, GORDON N J, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2): 174–188.
- [26] 毕海芸, 马建文, 秦思娴, 等. 基于残差重采样粒子滤波的土壤水分估算和水力参数同步优化[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(5): 1002–1016.
- BI Haiyun, MA Jianwen, QIN Sixian, et al. Simultaneous estimation of soil moisture and hydraulic parameters using residual resampling particle filter[J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 44(5): 1002–1016. (in Chinese)
- [27] ZHANG H, QIN S, MA J, et al. Using residual resampling and sensitivity analysis to improve particle filter data assimilation accuracy[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1404–1408.
- [28] KRAUSE M R, CROSSMAN S, DUMOND T, et al. Random forest regression for optimizing variable planting rates for corn and soybean using topographical and soil data[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(6): 5045–5066.
- [29] GISLASON P, BENEDIKTSSON J. Random forests for land cover classification[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(4): 294–300.
- [30] 马玉平, 孙琳丽, 马晓群, 等. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 85–93.
- MA Yuping, SUN Linli, MA Xiaoqun, et al. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 85–93. (in Chinese)
-

(上接第159页)

- [18] 褚璇, 王伟, LAWRENCE K, 等. 基于颜色特征的含黄曲霉毒素玉米颗粒的检出方法[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(4): 112–118.
- CHU Xuan, WANG Wei, LAWRENCE K, et al. Detection method of corn kernels infected Aflatoxin based on color features[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(4): 112–118. (in Chinese)
- [19] 张楠楠, 刘伟, 王伟, 等. 基于图像处理的玉米颗粒霉变程度检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 112–116.
- ZHANG Nannan, LIU Wei, WANG Wei, et al. Research on detection of moldy degree for corn kernels based on image processing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 112–116. (in Chinese)
- [20] 赵炎, 张乃建, 王若兰. 霉变玉米真菌毒素含量与图像颜色特征参数之间的相关性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2015(12): 21–26.
- ZHAO Yan, ZHANG Naijian, WANG Ruolan. Correlation between mycotoxins content and image color feature parameters of moldy corn[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(12): 21–26. (in Chinese)
- [21] 王侨. 玉米种子的图像精选定向定位方法及装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- WANG Qiao. Research on method and machine of selection and directional positioning of corn seed[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [22] 赵博, 王烨, 董鑫, 等. 苏叶在线分选系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 156–162, 172.
- ZHAO Bo, WANG Ye, DONG Xin, et al. Design and experiment of online sorting system for Perillar[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 156–162, 172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.017. (in Chinese)
- [23] 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(Supp.1): 194–199. http://www.jcsam.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)
- [24] SOFU M M, ER O, KA M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 395–405.
- [25] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.