

在线式玉米单粒种子检测分选装置设计与试验

张 晗¹ 闫 宁¹ 吴旭东¹ 王 成² 罗 斌¹

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100094; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100094)

摘要: 针对农业生产中种子精选的需求,设计了在线式单粒种子检测分选装置,实现流水线式种子上料、检测和分选。该装置由上料装置、检测单元、分选单元和控制系统组成。上料装置通过两级振动实现籽粒的平铺,配合传输带完成籽粒的单粒化。检测单元由高速工业相机实时获取种子图像,并传送至上位机检测分析。控制系统根据检测结果和种子在图像中的位置,控制分选单元完成分选。利用搭建的装置采集了1 200粒正常种子、1 200粒霉变种子和1 200粒破损种子的图像,使用HALCON软件提取了单粒种子的18个颜色和12个形态特征,通过偏最小二乘判别分析法进行判别分析,分别构建了种子霉变和破损的检测模型,并利用搭建的装置和模型进行了验证试验。试验结果表明:在线式单粒种子检测分选装置分选速率大于300粒/min;其中霉变种子的分选准确率高于95%,破损种子分选的准确率高于89%。

关键词: 玉米种子; 种子霉变检测; 种子破损检测; 种子分选; 机器视觉

中图分类号: TP242.6; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)06-0159-08 **OSID:** 

Design and Experiment of Online Maize Single Seed Detection and Sorting Device

ZHANG Han¹ YAN Ning¹ WU Xudong¹ WANG Cheng² LUO Bin¹

(1. Beijing Research Center for Intelligent Agricultural Equipment, Beijing 100094, China

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of single seed sowing and precision seeding technology in China, higher requirements are put forward for the quality of single seed. In response to the current demand for fine seed selection in agricultural production, an online single seed detection and sorting device was designed. The device consisted of a feeding device, a detection unit, a sorting unit and a control system. The feeding device was composed of two sets of linear vibration devices, which can realize the flattening of the grains through two-stage vibration, and cooperate with the conveyor belt to complete the single granulation of the grains. The detection unit obtained the seed image in real time by the high-speed industrial camera, and transmitted it to the upper computer for detection and analysis. The sorting unit was made of sorting components and air compressor, which was used to remove the identified damaged or moldy grains. The control system controlled the sorting unit to complete the sorting according to the detection result and the position of the seed in the image. Furthermore, images of 3 600 corn seeds (1 200 normal seeds, 1 200 moldy seeds, and 1 200 damaged seeds) were collected by using the built device, and image processing algorithms were used to obtain the 18 color and 12 morphological characteristics of a single seed, and the partial least squares discrimination analysis method (PLSDA) was used for discriminant analysis, and the detection models of moldy and damaged seeds were constructed respectively. Then the online verification experiment was carried out by using the built device and model. The results showed that the sorting rate of the device was greater than 300 seeds/min; the sorting accuracy of the mildew model was higher than 95%, and the sorting accuracy of the damaged model was higher than 89%. The device can realize the full automation of corn seeds from feeding to sorting, and can detect and sort moldy and damaged corn seeds in real time.

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

收稿日期: 2021-06-15 修回日期: 2021-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701205)和北京市农林科学院青年基金项目(QNJ202104)

作者简介: 张晗(1991—),男,助理研究员,主要从事种子质量检测控制技术研究,E-mail: zhangha@nercita.org.cn

通信作者: 罗斌(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事种业装备及工程技术研究,E-mail: luob@nercita.org.cn

0 引言

种子分选是为了剔除不良种子、异物等,以提高种子的精度级别和利用率,进而提高种子质量^[1]。随着我国种子单粒和精量播种技术的发展,对单粒种子品质提出了更高了要求^[2-3]。传统种子分选是利用种子的外形的物理性质,进行批量分筛,获得物理性质上一致性较高的种子^[4],难以满足单粒精播的需求。因此开发逐粒化种子检测分选系统,逐粒化筛除霉变和破损种子,提高种子质量,进而提高种子发芽率,对保障生产具有重要意义。

早期种子分选多依靠手眼配合的人工分选,该方法依赖人工经验、效率低且错检率高,无法对不良品进行有效分选^[5-6]。目前种子分选设备主要是通过分选机械按照种子的物理特性,去除种子中的夹杂物质。国内外相关学者针对机械化分离清选装置已开展了较为系统研究,通过比重选^[7]、风选^[8]、重力式筛选^[9-11]去除种子中的未成熟、破损及其他异类种子,该方法适用于种子批量筛选,分类方式单一、精度低,只适用于种子批量清选分级。因此,研发在线式单粒种子检测分选装置,是目前玉米繁育阶段急需解决的问题。

近年来,随着机器视觉技术在农业领域的不断应用^[12-20],国内外一些研究学者尝试通过机器视觉技术检测种子大小、颜色、物理性状、霉变、破损。PEARSON^[21]研制了一种基于图像的玉米种子分选装置。该系统破损的玉米剔除率达到了74%,对正常玉米识别精度达到了91%。闫彬等^[22]使用数学形态学处理方法识别种子裂纹,该方法平均准确率为90.6%。张楠楠等^[23]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。孟繁佳等^[24]研发了一种玉米种子实时检测分选装置,通过HSV颜色空间差异识别霉变种子。这些研究为在线式单粒种子检测分选装置提供了参考。

本文基于机器视觉技术设计一种在线式单粒玉米种子检测分选装置。设计种子单粒化上料结构,使用高速工业相机采集种子的图像获取单粒种子颜色图像特征,并通过偏最小二乘判别分析法构建霉变和破损种子识别模型,实现种子单粒化的检测与分选。

1 硬件系统设计

1.1 整机结构

在线式单粒种子检测分选装置硬件部分主要由上料单元、检测单元、分选部件及控制系统组成。上料单元通过两组振动电机和多轨传输带实现玉米籽

粒逐粒进入检测单元;检测单元由工业相机和条形光源组成,用于获取籽粒图像;分选部件由多个气动电磁阀组成,在籽粒滑落过程中通过气动电磁阀的开闭,将霉变或者破损籽粒吹入对应料盒中;系统控制单元包含图像分析处理的上位机和继电器控制模块。装置整机结构如图1所示。

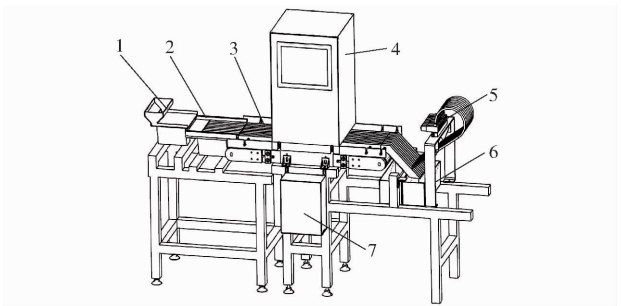


图1 在线式单粒种子检测分选装置结构图

Fig.1 Structure diagram of on line single seed detection and sorting device

1. 振动进料模块 2. 籽粒铺平模块 3. 多轨传输带 4. 采集装置 5. 气动电磁阀 6. 分料盒 7. 系统控制单元

1.2 关键结构设计

1.2.1 上料单元

上料单元将玉米种子逐粒传输至检测单元。上料单元包括进料斗、铺平料斗、振动电机1、振动电机2、多轨传输带,如图2所示。

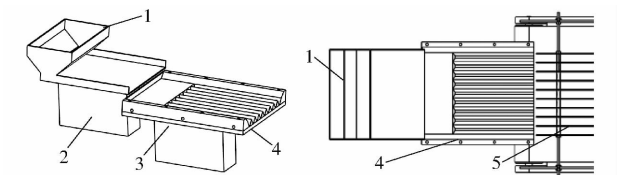


图2 上料单元结构图

Fig.2 Structure diagram of feeding device

1. 进料斗 2. 振动电机1 3. 振动电机2 4. 铺平料斗 5. 多轨传输带

上料单元通过两级振动实现籽粒逐粒化,振动发生器选用140#型直线振动器,通过调节模块振动频率控制进料斗中籽粒出料速度,将玉米籽粒均匀地输送到籽粒铺平模块;籽粒铺平模块的铺平料斗上开有9个倒V形溜槽,V形溜槽深度为1cm,溜槽V形斜面与水平面的角度为45°,通过振动在溜槽中将籽粒完成单层排列,逐粒进入传输带;传输带上分布9组轨道,9组轨道通过固定杆固定于传输带上方,轨道宽度为2cm,位置与V形溜槽一一对应;通过调节种子的下落速度与传输带速度,利用籽粒下落时间差,在运动的传输带上落点不同,完成籽粒的单粒化。

1.2.2 检测单元

检测单元选用中国大恒(集团)有限公司北京图像视觉技术分公司生产的MER-503-79U3C系

列彩色 CMOS 高速工业数字相机来获取种子图像，成像分辨率为 2 448 像素 × 2 048 像素。根据玉米通道分布宽度，选用焦距为 8 mm 的 Computar 镜头，摄像头安装距离为 37 cm，实际视场范围为 26 cm × 21 cm。选用 4 只 12 V 条形 LED 白光光源作为图像采集光源，4 只光源等间隔分布于检测单元顶部。采集背景为亚光黑的传输带，其上轨道分为前后两段，轨道从采集区域断开，从而避免轨道影响图像采集。

1.2.3 分选单元

分选单元用于剔除识别的破损或霉变籽粒，由分选部件和空气压缩机组成。分选部件包括籽粒下落滑轨、电磁阀、气管、支架、料盒、气泵，结构如图 3 所示。种子通过传输带运输至下落滑轨，沿滑轨下落的过程中，关闭电磁阀则落入料盒 A，开启电磁阀则落入料盒 B，通过电磁阀的开闭将种子吹入对应料盒完成种子分选。

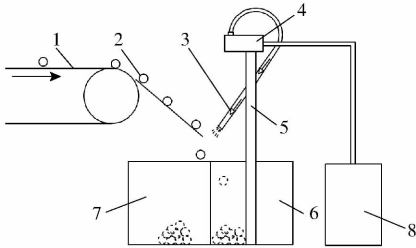


图 3 分选部件结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of sorting unit

1. 传输带 2. 籽粒下落滑轨 3. 气管 4. 电磁阀 5. 支架 6. 料盒 A 7. 料盒 B 8. 气泵

1.3 采集和分选策略

1.3.1 控制单元与流程

控制单元主要由 DM1600 串口继电器模块与典籍 I7 6567U 工控机作为上位机组合而成。控制单元用于控制玉米种子进料，并对采集的图像信息进行分析处理，根据分析处理的结果来触发电磁阀完成种子分选。控制系统框图如图 4 所示。控制系统中共使用了 12 个输出信号分别对应振动电机 1、振动电机 2、传输带和 9 个电磁阀。

装置工作流程图如图 5，流程如下：①系统上电，工控机、空气压缩机和光源分别启动，在计算机端启动检测控制系统，完成准备工作。②启动传输带，调整传输带速度。③依次启动振动电机 1、振动电机 2，进行种子的逐粒化上料。④启动检测系统，设置相机采集间隔时间为 t 。玉米籽粒随传输带进入检测单元，检测单元通过分析籽粒图像，获取籽粒特征和籽粒横向坐标，进行籽粒识别并估算吹气时间。系统进入自动检测分选阶段。⑤待全部籽粒分选完成后，从分料盒取出分选的籽粒，完成分选。

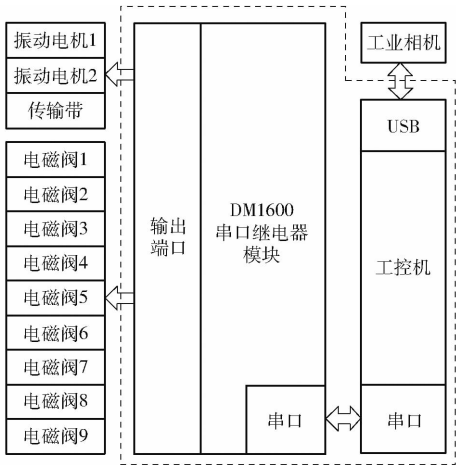


图 4 控制系统框图

Fig. 4 Control system block diagram

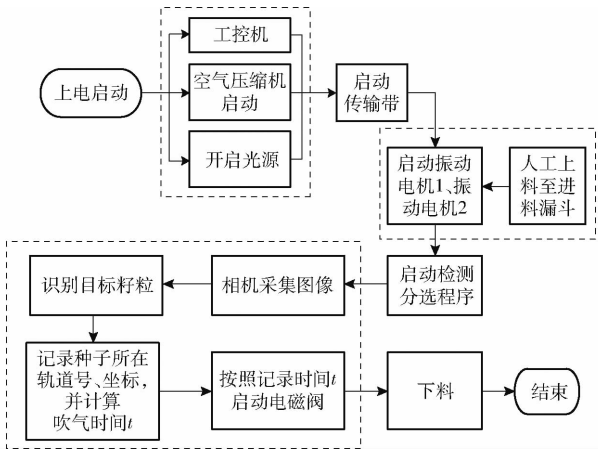


图 5 系统控制流程图

Fig. 5 Working flow chart of device

1.3.2 采集策略

通过面阵相机连续拍摄，获取传输带上全部籽粒图像。为保证全部籽粒图像均被获取，采集间隔 t 等于相机的视场宽度减去单粒种子补偿宽度 l 除以传输带速度。拍照时处于图像边缘不完整的籽粒，可以通过补偿宽度重复获取，得到完整籽粒信息。不完整的籽粒将通过图像处理进行剔除处理。

测量的 1 200 粒正常玉米种子长度在 8 ~ 14 mm 之间，平均长度约为 12 mm。补偿宽度 l 应大于单粒玉米种子的最大长度。本研究选取 1.5 倍的玉米籽粒平均长度作为补偿宽度，约 18 mm，约占 170 个像素点。

获取的种子图像如图 6a 所示，红色框所占区域为补偿长度区域，图像边缘的 170 个像素点为重叠区域。通过玉米投影区域坐标值判别，实现图像中边缘不完整颗粒剔除，同时剔除重复出现籽粒。重叠区域不完整颗粒剔除算法如下：

(1) 提取原始种子图像中坐标 $(x \in (1, 2\,048), y \in (1, 170); x \in (1, 2\,048), y \in (2\,279, 2\,448))$ 区域

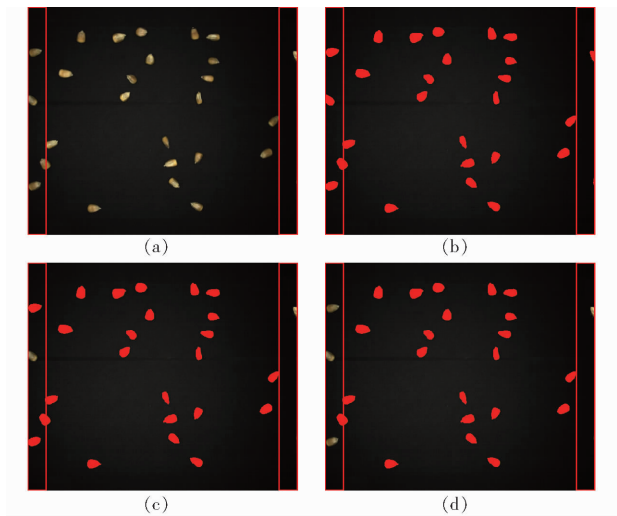


图 6 重叠不完整籽粒剔除

Fig. 6 Overlapping and incomplete grain removal

图像,即红色框内补偿长度区域图像,如图 6a。

(2) 利用阈值分割,原始种子获取玉米种子投影区域,如图 6b。

(3) 通过投影区域坐标,剔除包含坐标($x \in (1, 2\ 048)$ 、 $y = 1$)和($x \in (1, 2\ 048)$ 、 $y = 2\ 448$)的投影区域,如图 6c。

(4) 通过投影区域坐标,剔除补偿长度区域中坐标不包含($x \in (1, 2\ 048)$ 、 $y = 170$)投影区域,如图 6d 剩余红色覆盖的区域为单次采集对应的种子颗粒。

由于单粒上料装置籽粒间距存在随机性,气动电磁阀存在最小开闭时间间隔,当籽粒间距过小时,会出现误吹、漏吹,影响精度。提高传输带速度可以一定程度上降低种子密集程度,但是本装置使用面阵相机进行采集,当传输带速度过高时,会造成获取图像质量下降。因此本装置最终设置传输带速度为 120 mm/s,相机采集间隔为 2 s。

1.3.3 分选策略

气动分选装置由上位机软件根据检测结果通过串口协议直接控制,当判别籽粒为霉变或者破损时,通过籽粒在图像中所处的横向坐标 X ,估算电磁阀启动气吹籽粒的时间 T 。

籽粒从采集区域到分选位置总共分为 3 段,如图 7 所示,第 1 段种子随传输带匀速前进,种子通过第 1 段所用时间 T_1 计算方法为

$$T_1 = L_1 / v \quad (1)$$

式中 L_1 ——第 1 段长度

v ——传输带距离

第 2 段种子沿传输带转轴边缘转动,传输带与种子的摩擦力大于重力分量,因此种子沿传输带匀速转动。种子通过第 2 段所用时间 T_2 计算方法为

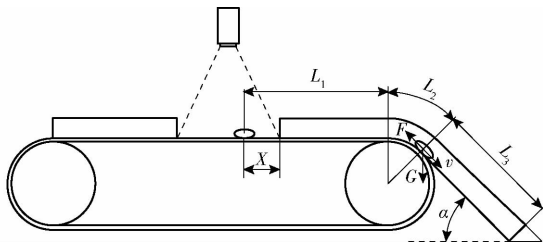


图 7 籽粒传输示意图

Fig. 7 Grain transport schematic

$$T_2 = \frac{\pi R \alpha}{180 v} \quad (2)$$

式中 L_2 ——第 2 段长度, mm

α ——下落滑轨与水平面夹角, 为 45°

R ——传输带转动半径, mm

第 3 段种子沿下落滑轨滑落, 受到重力作用加速运动, 加速度为 a , 种子通过第 3 段所用时间 T_3 计算方法为

$$T_3 = \frac{\sqrt{v^2 + 2(g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha)L_3} - v}{g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha} \quad (3)$$

式中 L_3 ——第 3 段长度, mm

μ ——下落滑轨与种子摩擦因数, 约为 0.35

g ——重力加速度, mm/s²

当传输带速度确定后, T_2 和 T_3 随之确定, 籽粒气吹分选的时间仅由第 1 段长度确定, 第 1 段长度可以通过籽粒在图像中横向坐标 X 进行计算。故本文通过相机获取种子在图像中的位置, 计算种子到达分选位置的时间来控制电磁阀进行气动分选。

2 图像处理与模型建立

2.1 图像特征获取

试验种子为 2019 年采购自甘肃省张掖市的无包衣郑单 958 玉米种子。将玉米种子置于 28°C 、相对湿度 85% 人工气候箱内储藏 12 d 以加速霉变, 12 d 后取出, 干燥处理后得到霉变玉米种子^[25]。破损种子是通过人工破损, 剔除其中破损面积大于 50% 的种子。选取正常种子、霉变种子、破损种子各 1 200 粒, 利用装置自动振动上料, 在线触发采集图像, 提取玉米籽粒图像如图 8 所示。

使用 HALCON 图像处理软件对种子图像进行特征信息提取, 通过阈值分割将籽粒从背景中分割提取, 从而将玉米种子区域识别出来。

本研究中除采用人眼最为敏感的 RGB 颜色模型外, 还加入了 HSV 颜色空间模型和不依赖光线的 Lab 颜色模型数据作为颜色信息的补充。通过 HALCON 分析软件分别获取每粒种子的 RGB、HSV、Lab 各分量的均值和标准差等共计 18 个颜色特征, 同时提取玉米种子的长度、宽度、投影面积、

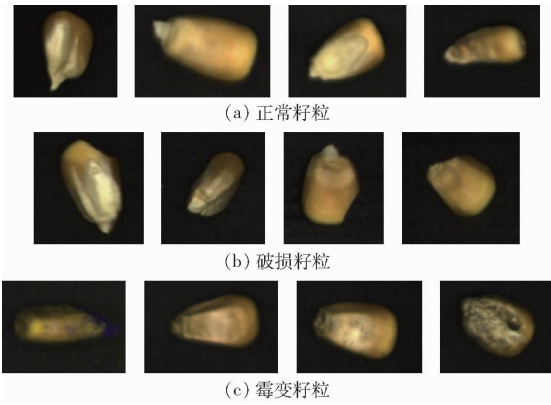


图 8 玉米籽粒图像
Fig. 8 Corn grain images

圆形度(投影面积与最大外接圆面积比)、周长、凹凸性(投影面积与最小外接凸边型面积的比值)、矩形体、最小外接圆半径、最大内切圆半径、边心距

(边缘到形心的平均距离)、边心差(边缘到形心的最大距离偏差)、最长投影(轮廓区域点之间的最大距离)等 12 个形状特征。最终获取的 3 600 粒种子颜色和形态特征共计 30 个,其特征的概率密度分布如图 9 所示。

从图 9 中可以看到,正常籽粒和霉变籽粒在形状特征上的分布基本相同,其特征分布差异主要分布在 18 个颜色特征上。正常籽粒和破损籽粒其特征分布差异主要分布在形状特征上,颜色特征中的 S 均值、 S 标准差、 b 均值、 b 标准差上也存在一些差异。但是正常籽粒、霉变籽粒和破损籽粒全部特征在概率密度分布上都出现重叠区域,因此依靠单一的特征无法实现全部籽粒的判别分析。

2.2 识别模型构建

随机散落状态下的正常籽粒、霉变籽粒和破损

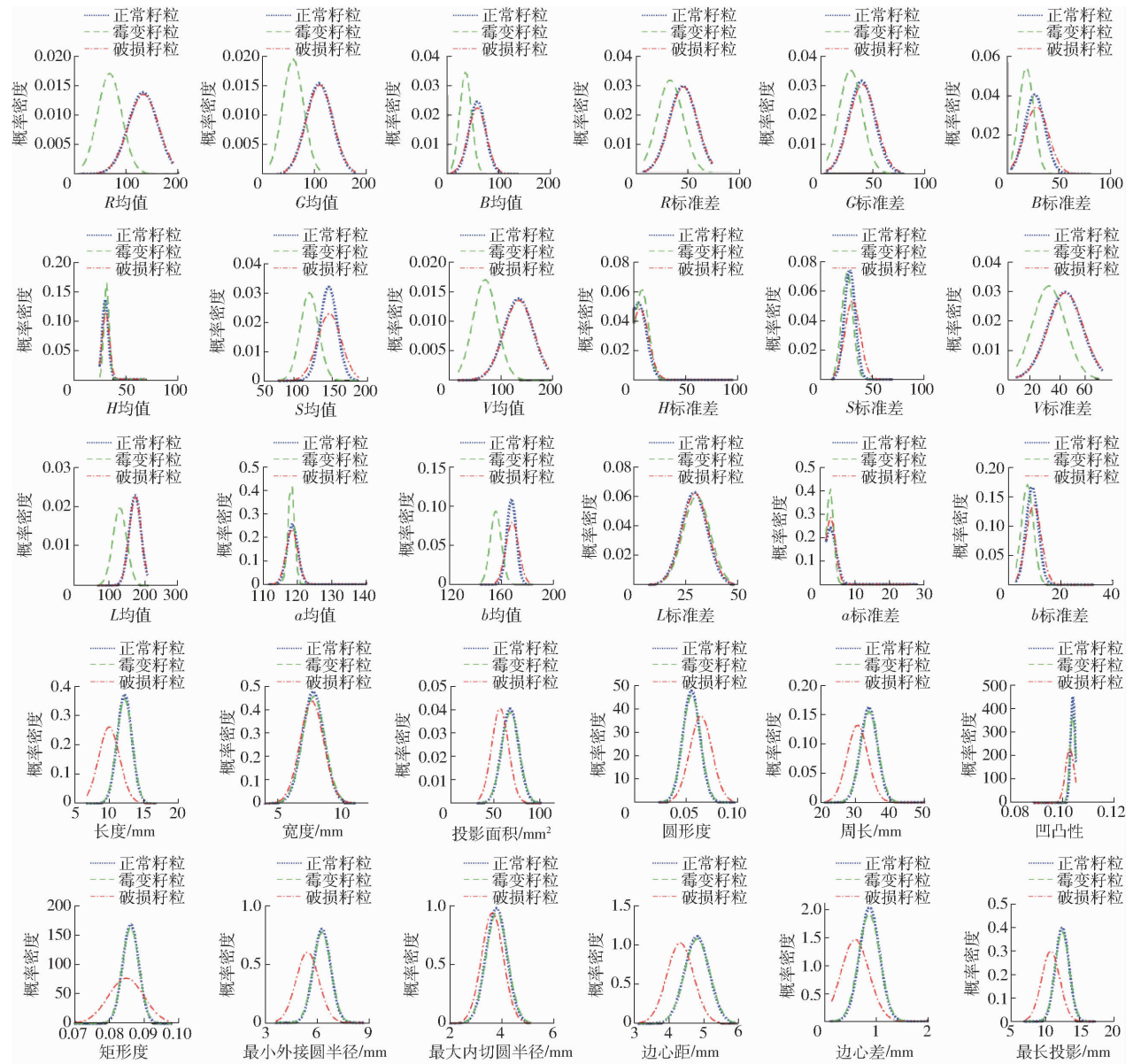


图 9 30 个特征的概率密度分布

Fig. 9 Probability density distributions of 30 features

籽粒各特征概率密度分布图均存在重叠,表明根据单个特征并不能够实现正常籽粒、霉变籽粒和破损籽粒的区分。因此本文利用偏最小二乘法进行多特征的判别分析,建立霉变种子、破损种子的检测模型,进行霉变种子和破损种子的识别。

2.2.1 偏最小二乘判别分析法

偏最小二乘判别分析算法(Partial least squares discrimination analysis,PLSDA)是一种稳健的判别分析统计方法^[26],该方法结合多元线性回归和主成分分析的优点,能够在自变量数多、存在多重相关性且

自变量本身相关性较差的条件下进行回归建模。因此,利用玉米种子特征参数建立霉变种子和破损种子识别的PLSDA模型。

2.2.2 霉变、破损种子的PLSDA识别模型建立

利用Matlab 12.0软件构建PLSDA模型,将每种玉米图像数据按照3:1比例随机分配,将每种种子1200个样本数据划分为建模集和预测集,即建模集900个样本,预测集300个样本,混合建模。采用PLSDA算法分别建立霉变种子和破损种子识别模型,识别的结果如表1所示。

表 1 PLSDA 模型的识别结果
Tab.1 PLSDA model recognition results

模型	样本	建模集				预测集			
		识别正确 数量/粒	识别错误 数量/粒	正确率/%	准确率/%	识别正确 数量/粒	识别错误 数量/粒	正确率/%	准确率/%
霉变模型	霉变	899	1	99.89	99.78	298	2	99.33	99.33
	正常	897	3	99.67		298	2	99.33	
破损模型	破损	821	79	91.20	92.44	271	29	90.33	91.50
	正常	843	57	93.67		278	22	92.66	

采用文中提取的颜色和性状特征建立识别模型,最终霉变模型预测集的识别准确率为99.33%,霉变种子和正常种子识别正确率均为99.33%。破损模型预测集的识别准确率为91.50%,其中破损种子识别正确率为90.33%,正常种子识别正确率为92.66%。从整体上看,霉变模型种子的识别正确率高于破损模型种子的识别正确率,原因可能在于本装置在获取种子图像时只能采集到种子的单表面图像信息,种子霉变在种子的胚面和胚乳面均有出现颜色变化,而部分破损种子的破损位置处于种子的单侧,通过相机俯拍不能很好地获取种子的破损特征。

3 样机试验

根据以上设计思路搭建了在线式单粒种子检测分选装置样机,样机实物如图10所示。

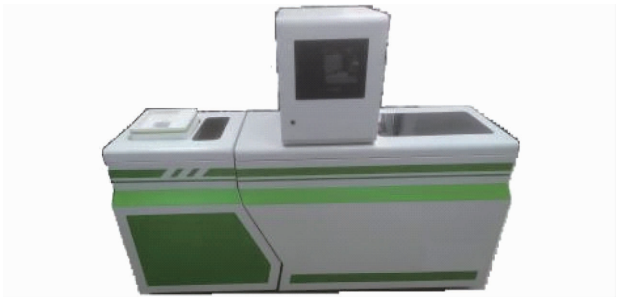


图 10 设备样机

Fig.10 Equipment prototype

为验证装置稳定性与可靠性,分别选取1000粒霉变种子、1000粒破损种子与1000粒正常种子混

合。获得含有50%霉变种子混合样本1和50%破损种子的混合样本2,进行在线式种子分选试验。

3.1 系统运行试验

利用装置样机分别开展霉变和破损种子的分选试验,将种子倒入进料斗进行自动上料,对混合样本进行识别,通过喷气将识别的霉变种子或破损种子喷入分料盒B中,完成分选,每个试验重复3次。

每次分选完成后分别统计分料盒A中霉变、破损籽粒的数量和正常籽粒数量,分料盒B种子正常籽粒数量和霉变或破损籽粒的数量,计算分选准确率。通过2000粒种子混合样本从开始分选至分选完成全过程所耗费总时间,计算分选速率。

种子剔除率 A_R 、正常种子获选率 A_S 、准确率 A_{uc} 计算公式为

$$A_R = \frac{T_N}{T_N + F_p} \times 100\%$$
 (4)

$$A_S = \frac{T_p}{T_p + F_N} \times 100\%$$
 (5)

$$A_{uc} = \frac{T_p + T_N}{T_p + F_N + T_N + F_p} \times 100\%$$
 (6)

式中 T_p ——盒A中正常种子数量
 F_N ——盒A中霉变或破损种子数量
 T_N ——盒B中霉变或破损种子数量
 F_p ——盒B中正常种子数量

3.2 结果与分析

分选结果如表2所示。通过表2可以看出,本文设计的分选装置对霉变种子分选准确率为95%

以上,正常种子的获选率高于 97%;破损种子分选准确率为 89% 以上,正常种子的获选率高于 90%;装置的分选精度主要受两个因素影响:受检测方式和算法精度影响,目前装置对玉米种子进行单面检测,算法采用不区分胚面胚乳面的建模方式,无法准

确地检测玉米破损特征;装置气选的精准确度,气选过程中种子存在粘连或者距离太近,导致漏吹。因此试验结果呈现出盒 A 种子略多于盒 B 的现象,且样机试验精度较模型精度略有下降,最终装置分选准确率略低于算法准确率。

表 2 分选试验结果
Tab.2 Sorting test results

分选类型	试验批次	盒 A		盒 B		分选速率/ (粒·min ⁻¹)	种子剔除 率/%	正常种子 获选率/%	准确率/%
		正常种子 数量/粒	剔除种子 数量/粒	剔除种子 数量/粒	正常种子 数量/粒				
霉变分选	1	971	54	946	29	337	94.6	97.1	95.85
	2	983	35	965	17	319	96.5	98.3	97.40
	3	987	36	964	13	308	96.4	98.7	97.55
破损分选	1	912	106	894	88	313	89.4	91.2	90.30
	2	904	121	879	96	322	87.9	90.4	89.15
	3	916	102	898	84	306	89.8	91.6	90.70

装置的分选速率在 300 粒/min 以上。分选速率主要受 3 个因素影响:①上位机的算法处理效率。目前处理单幅图像中的采集和数据分析时间小于相机的采集间隔。②振动上料速度。装置采用振动电机带动种盘,调节电压,振频增加,上料速度加快,籽粒下落越密集,单幅图像中所能分析处理的玉米籽粒越多。同时振动上料使得种子下落不均匀,因此分选速率会在一定范围内波动。③相机的采集帧率。系统采用面阵相机获取种子图像信息,当传输带速度过高时,图像清晰度下降,获取种子图像边缘会出现重影。因此在保证获取高质量图像的前提下,提高相机采集帧率,传输带最高速度也可以随之提高,进而提高装置的分选速率。目前装置分选速率主要受到相机采集帧率的影响,可通过匹配更高帧率的高速工业相机来提高传输带速度上限。

试验结果表明本文设计的装置能够实现玉米种

子从进料到分选的全自动化,对霉变和破损玉米种子进行实时检测和分选。

4 结 论

(1)设计并搭建了一种在线式单粒种子检测分选装置,该装置可实现玉米籽粒逐粒化上料、检测和分选。

(2)使用图像处理技术实现种子颜色和图像的快速提取,通过偏最小二乘判别分析法构建了霉变籽粒和破损籽粒判别分析模型,并通过种子在图像中的坐标值确定种子的气吹剔除时机,实现了霉变种子和破损种子的在线检测与分选。

(3)试验表明,该装置可以实现在线式单粒种子检测分选,其中霉变种子分选准确率为 95% 以上,破损种子分选准确率为 89% 以上,分选速率高于 300 粒/min。

参 考 文 献

[1] 吴凌云,李明. 种子清选精选技术[J]. 种子, 2009(10):120-123.
WU Lingyun,LI Ming. The technology of seed cleaning and upgrading[J]. Seed,2009(10):120-123. (in Chinese)

[2] 孙明涛. 玉米单粒和精量播种对种子质量的要求及其栽培技术要点[J]. 种子,2013(4):120-121.
SUN Mingtao. The requirements of seed quality and cultivation techniques for com sowing with single grain and precision[J]. Seed,2013(4):120-121. (in Chinese)

[3] 李洋. 吉林省宜精播玉米种子质量评价及检测技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学,2016.
LI Yang. Seed quality evaluation and testing technology research of appropriate precision seed maize in Jilin Province[D]. Changchun:Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[4] 李雅丽,孙静,刘阳. 花生霉变程度判定指标研究[J]. 食品科技,2013(9):309-313.
LI Yali,SUN Jing,LIU Yang. The judgment indicators of moldy peanuts[J]. Food Science and Technology,2013(9):309-313. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 张红生,胡晋. 种子学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社,2016.

[7] 王升升,陈盼,卢梦晴,等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):181-190.

- WANG Shengsheng, CHEN Pan, LU Mengqing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for Chinese cabbage seeds harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 2): 181 – 190. (in Chinese)
- [8] 曹成茂, 罗坤, 彭美乐, 等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 105 – 112.
CAO Chengmao, LUO Kun, PENG Meile, et al. Experiment on winnowing mechanism and winnowing performance of hickory material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 105 – 112. (in Chinese)
- [9] 王旭, 李小燕, 王全喜, 等. 台式重力分选机设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 91 – 97.
WANG Xu, LI Xiaoyan, WANG Quanxi, et al. Design and experiment of the desktop gravity separator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 91 – 97. (in Chinese)
- [10] 李永磊, 万里鹏程, 陈海军, 等. 批次式种子清选装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 48 – 58.
LI Yonglei, WAN Lipengcheng, CHEN Haijun, et al. Design and experiment of batch seed cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 48 – 58. (in Chinese)
- [11] 王立军, 冯鑫, 郑招辉, 等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 104 – 113.
WANG Lijun, FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 104 – 113. (in Chinese)
- [12] 成芳, 应义斌. 机器视觉技术在农作物种子质量检验中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 175 – 179.
CHENG Fang, YING Yibin. Application of machine vision to quality evaluation of agricultural seed resources[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 175 – 179. (in Chinese)
- [13] 孙群, 王庆, 薛卫青, 等. 无损检测技术在种子质量检验上的应用研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(3): 1 – 6.
SUN Qun, WANG Qing, XUE Weiqing, et al. Advances in nondestructive detection of seed quality[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(3): 1 – 6. (in Chinese)
- [14] 彭江南, 谢宗铭, 杨丽明, 等. 基于 Seed Identification 软件的棉籽机器视觉快速精选[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 147 – 152.
PENG Jiangnan, XIE Zongming, YANG Liming, et al. Quickly selection for cotton seed based on Seed Identification software[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 147 – 152. (in Chinese)
- [15] 陈桂珍, 龚声蓉. 计算机视觉及模式识别技术在农业生产领域的应用[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 409 – 413.
CHEN Guizhen, GONG Shengrong. Application of computer vision and pattern recognition technology in agricultural production[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(8): 409 – 413. (in Chinese)
- [16] 宋鹏, 张晗, 王成, 等. 玉米籽粒考种信息获取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 24 – 30.
SONG Peng, ZHANG Han, WANG Cheng, et al. Design and experiment of maize kernel traits acquisition device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 24 – 30. (in Chinese)
- [17] 陈满, 倪有亮, 金诚谦, 等. 基于机器视觉的大豆机械化收获质量在线监测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 91 – 98.
CHEN Man, NI Youliang, JIN Chengqian, et al. Online monitoring method of mechanized soybean harvest quality based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 91 – 98. (in Chinese)
- [18] TU K, WEN S, CHENG Y, et al. A non-destructive and highly efficient model for detecting the genuineness of maize variety ‘JINGKE 968’ using machine vision combined with deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106002.
- [19] 张晗, 王成, 董宏图, 等. 基于机器视觉的白菜种子精选方法研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 31 – 36.
ZHANG Han, WANG Cheng, DONG Hongtu, et al. Study on the seed selection method of Chinese cabbage based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 31 – 36. (in Chinese)
- [20] 吴宇峰, 李一鸣, 赵远洋, 等. 基于计算机视觉的奶牛体况评分研究综述[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 268 – 275.
WU Yufeng, LI Yiming, ZHAO Yuanyang, et al. Review of research on body condition score for dairy cows based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 268 – 275. (in Chinese)
- [21] PEARSON T. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 12 – 18.
- [22] 闫彬, 杨福增, 郭文川. 基于机器视觉技术检测裂纹玉米种子[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 181 – 185, 235.
YAN Bin, YANG Fuzeng, GUO Wenchuan. Detection of maize seeds with cracks based on machine vision technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 181 – 185, 235. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 孟繁佳, 罗石, 孙红, 等. 玉米种子实时检测分选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 153 – 157, 177.
MENG Fanjia, LUO Shi, SUN Hong, et al. Design and experiment of real-time detection and sorting device for maize seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 153 – 157, 177. (in Chinese)
- [25] 沈飞, 黄怡, 周曰春, 等. 基于光谱和图像信息融合的玉米霉变程度在线检测[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 274 – 280.
SHEN Fei, HUANG Yi, ZHOU Yuechun, et al. On-line detection of mildew degree of maize based on spectral and image information fusion[J]. Food Science, 2019, 40(16): 274 – 280. (in Chinese)
- [26] 王庆国, 黄敏, 朱启兵, 等. 基于高光谱图像的玉米种子产地与年份鉴别[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(2): 163 – 170.
WANG Qingguo, HUANG Min, ZHU Qibing, et al. Geographical origin and years identification of maize seeds based on the hyperspectral image[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(2): 163 – 170. (in Chinese)