doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.011

基于 *K* 值法的谷子穴播成穴性检测方法

曹　政[1]　衣淑娟[1]　王　淞[1]　陈　涛[1]　李衣菲[2]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院，大庆 163319；2.东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030)

摘要： 针对目前谷子成穴性不能检测且穴径测量没有准确方法等问题，提出一种基于 K 值法的谷子穴播成穴性检测方法。建立了基于 K 值法的谷子成穴性判据，基于图像识别完成对播种后谷子边界点的提取，利用一种改进 Welzl's 算法筛选关键边界点并求取穴径，设计了谷子穴播成穴性检测系统，可完成对排种的图像处理，并在检测界面显示做圆效果、穴径、成穴性检测结果等相关信息。试验结果表明，改进 Welzl's 算法较 Welzl's 算法、RIA 算法、Dps 算法时间压缩比均大于1，最高达16.94，且所做最小外接圆与 Welzl's 算法和 RIA 算法所做结果保持一致；对谷子穴播勺链式导种装置在具体参数设定下成穴性进行检测，K 为75% ~125% 试验组数占试验总体82.6%，重播情况占试验总体9.1%，漏播情况占试验总体8.3%，说明导种装置在该参数组合设置情况下排种稳定性和成穴性良好。研究结果表明所设计的系统对成穴性检测具有一定贡献。

关键词： 谷子穴播；成穴性检测；穴径测量；图像处理

中图分类号： S237　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2026)06-0119-10　　**OSID：**

Detection Method of Hole Formation in Foxtail Millet Based on *K*-value

CAO Zheng[1]　YI Shujuan[1]　WANG Song[1]　CHEN Tao[1]　LI Yifei[2]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In view of the current problems such as the inability to detect the hole-forming property of millet and the lack of an accurate method for measuring the hole diameter, a detection method for the hole-forming property of millet based on the K-value method was proposed. Firstly, a criterion for the hole-forming property of millet based on the K-value method was established. Secondly, the boundary points of the sown millet were extracted based on image recognition, and a modified Welzl's algorithm was used to screen the key boundary points and calculate the hole diameter. Finally, a detection system for the hole-forming property of millet was designed, which can complete the shooting of the sown seeds and display the results of the circle-making effect, hole diameter, and hole-forming property detection on the detection interface. The experimental results showed that the time compression ratio of the modified Welzl's algorithm was greater than 1 compared with that of the Welzl's algorithm, RIA algorithm, and Dps algorithm, with the highest reaching 16.94. Moreover, the size of the minimum circumscribed circle made by the modified Welzl's algorithm was consistent with the results made by the Welzl's algorithm and RIA algorithm. The hole-forming property of the spoon chain seed delivery device for millet hole sowing under specific parameter settings was detected. The number of test groups with K values between 75% and 125% accounted for 82.6% of the total tests, the double-sowing situation accounted for 9.1%, and the missed-sowing situation accounted for 8.3%. This indicated that the seed delivery device had good seed sowing stability and hole-forming property under this parameter combination setting. The experimental results showed that this system had certain contributions to solving the practical problem of being unable to detect the hole-forming property.

Key words: cave sowing of millet; seedling hole formation detection; hole diameter measurement; image recognition

收稿日期：2024-12-31　修回日期：2025-01-18

基金项目： 国家自然科学基金项目(52275246)和黑龙江省高等教育教学改革研究项目(SJGY20220484)

作者简介： 曹政(2000—)，男，硕士生，主要从事农业机械研究，E-mail：19845920706@163.com

通信作者： 衣淑娟(1965—)，女，教授，博士生导师，主要从事小籽粒播种装置研究，E-mail：yishujuan_2005@126.com

0 引言

谷子由于其耐干旱、耐贫瘠、易储藏且含有丰富的营养等特点，被人们广泛使用并一直延续至今[1]。谷子播种机可以提高作业效率、减轻劳动强度，更重要的是可实现精量播种，精准把控播种数、穴径等[2]。播出的谷子过于紧凑则会导致其在生长期间不能获得足够的养分和水分，谷子之间的竞争也会增加；过于松散则会导致资源的浪费，因此成穴性的检测是不可或缺的，但由于谷子三轴尺寸较小，播量不易被控制，成穴性的检测也较为困难。为了有根据地改进排种器，提高排种能力和排种精度，对谷子排种器进行成穴性检测，从而完成反馈具有重要意义[3]。

对排种器排种效果的检测方法有人工数种检测法、光电传感器检测法、电容式传感器检测法和机器视觉检测法[4]。人工数种检测法由于检测速度慢，需要大量的人力物力，且不可避免会产生错误；光电传感器检测法其结构简单，但会出现多粒种子与传感装置处于同一直线而造成无法准确判断种数等问题[5-6]；电容式传感器检测法灵敏度较高但其依赖于被测物体或介质的介电常数，针对不同检测对象和环境，需要不断校正传感器[7-8]；机器视觉检测法具有高效性、准确性以及可靠的无损非接触式操作等优点[9]，再配合高速摄像实时无压缩处理技术，可以很好地解决此类问题，但对于作业环境也有着较高要求[10]。

国家有单粒穴播性能测定标准，但尚未有多粒穴播测定标准，为此，韩子乐等[11]提出了一种“三线法”用于测定成穴直径、穴距，可以看出各穴内的穴粒数和播种均匀性，但对于穴径测量不够严谨，没有考虑竖直方向上种子分布情况，且仍需人工对试验结果进行汇总分析。衣淑娟等[12]对其设计的正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器进行播种性能检测时，提出了做穴内所有谷子的最小外接圆，以外接圆的直径作为穴径，利用人工测量进行成穴性检测。衣淑娟等[13]设计的谷子穴播勺链式导种装置在进行纳种合格率计算时，提出使用以种群最小外接圆小于 5cm 为穴径合格的检测标准，但对过于密集播种的情况尚未进行说明。穴径的测量目前还没有实现自动化，随着样本数量的增加，对其测量误差也会随之增大，且对排种器的排种性能进行检测时，缺少了对种子成穴性的综合检测。因此，实现对穴径采集的智能化，从而对穴径进行整体性分析，完成对成穴性的检测很有意义。

针对上述问题，本文提出一种基于图像处理技术测量谷子穴径的方法，利用改进 Welzl's 算法完成对穴径的测量，通过 K 值法完成对穴内谷子的成穴性检测。

1 成穴性检测方法

国内目前还没有谷子播种机成穴性检测方法的统一标准，且穴径与播种环境、播种机播种方式也有着密切的关系。为了完成谷子穴播的成穴性检测，及时给出播种反馈，提出一种 K 值法检测成穴性。

1.1 K 值法

穴内谷子形成的覆盖面可近似看成圆形，圆形面积由穴内籽粒间距决定，穴内谷子籽粒间距与谷子的种类，生长环境和土质等均有很大关系，需要结合多方面因素进行合理调整。

根据谷子精量穴播的农艺要求，每穴谷子数量为 5 ~7 粒，在保证穴内籽粒间距均匀的情况下，提出穴粒数为 5 ~7 的 3 种情况理想化播种结果：穴粒数为 5 时，理想化播种结果为 4 粒位于正方形的 4 个顶点上，1 粒位于正方形的几何中心；穴粒数为 6 时，理想化播种结果为 5 粒位于正五边形的 5 个顶点上，1 粒位于正五边形几何中心；穴粒数为 7 时，理想化播种结果为 6 粒位于正六边形的 6 个顶点上，1 粒位于正六边形几何中心。位于几何中心的谷子与位于正多边形顶点的谷子之间距离即为理想化谷子间距，理想化谷子间距随着实际播种情况而定。正多边形外接圆面积即为对应的穴面积，在保证穴内籽粒间距均匀的情况下，这 3 种情况所形成的穴面积是最小的。

针对实际谷子精量穴播，播种过于稀疏或过于密集反映穴内种子的分布情况，重播与漏播本质上也是播种过程单位面积内种子数量分配的不均匀性问题。如果对单位播种面积内的每穴谷子间距进行分析，将会耗费大量的算力，故结合 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》中关于条播情况下漏播与重播的要求，提出一种谷子穴播成穴性检测方法。如图 1 所示，分别为穴粒数为 5、6、7 时理想化播种结果与漏播、重播示意图，当穴内谷子所做外接圆半径大于 1.5 倍理论谷子间距（即大于 l_3）称为漏播，小于 0.5 倍理论谷子间距（即小于 l_1）称为重播。当谷子所做外接圆半径大于 1.5 倍或小于 0.5 倍理想化谷子间距时，则说明该穴谷种的成穴性差；当谷子所做外接圆半径小于等于 1.5 倍或大于等于 0.5 倍理想化谷子间距时，则说明该穴谷种成穴性良好。

由于理想化谷子间距并没有确定的范围，根据

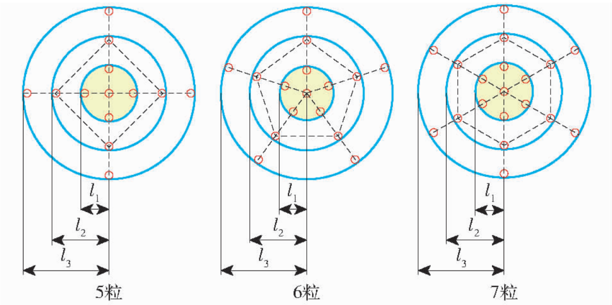


图 1　理想化播种与漏播、重播结果示意图

Fig. 1　Comparison diagram of idealized sowing, sparse sowing and dense sowing

外界环境和排种器本身而变化，故不同情况下理想化谷子间距可根据实际排种方式和设备参数等发生变化，因此，需要通过多组试验确定排种器在该参数设置下的综合理想化谷子间距。

根据成穴性检测方法，检测指标 K，计算式为

$$K=\frac{|S_1-S_2|}{S_2}\times 100\% \tag{1}$$

式中　S_1——实际谷子所做外接圆面积，mm^2

S_2——理想化谷子间距所做外接圆面积，mm^2

当出现漏播情况时，检测指标 K_m 计算式为

$$K_m=\frac{|\pi(1.5r')^2-\pi r'^2|}{\pi r'^2}\times 100\% \tag{2}$$

式中　r'——综合理想化谷子间距，mm

此时 K_m 为 125%。

当出现重播情况时，检测指标 K_r 计算式为

$$K_r=\frac{|\pi(0.5r')^2-\pi r'^2|}{\pi r'^2}\times 100\% \tag{3}$$

此时 K_r 为 75%。

结合 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》中关于粒距合格指数的要求，拟定试验中成穴性良好组数占试验总体组数的 60% 以上，即说明排种器排出种子的成穴性良好。

1.2　误差消除

1.2.1　误差来源

检测成穴性前还需判断谷子半径对所做外接圆的影响。重播与漏播的检测中，距离的选择是相邻 2 粒谷子几何中心间的距离，但实际穴内谷子所做外接圆半径还应包含谷子半径，如图 2 所示。由圆环性质可知，漏播情况下，穴内谷子外接圆面积与 1.5 倍理想化谷子间距所做的外接圆面积的差值会随着理想化谷子间距增大而增大，同理，重播情况下，穴内谷子外接圆面积与理想化谷子间距所做的外接圆面积的差值会随着理想化谷子间距增大而增大。故需考虑谷子半径相对于理想化谷子间距是否可以忽略。

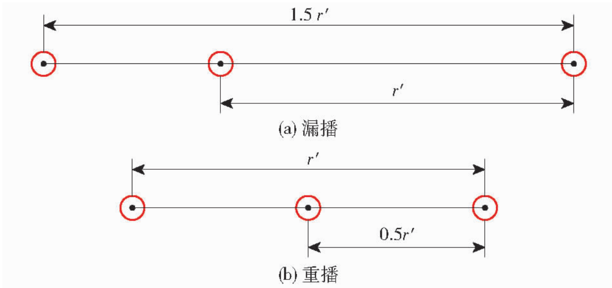


图 2　谷子半径与理想化谷子间距对比

Fig. 2　Grain seed radius and idealized grain spacing

1.2.2　种子三轴尺寸

试验对象选择黑龙江省种植面积较大的大穗金谷，对其进行分级处理，随机选择 1 000 粒，以谷子的长、宽、高三轴为测量指标，利用精度为 0.02 mm 电子游标卡尺进行测量，对测量结果进行统计与分析，结果如表 1 所示。通过球度公式计算其球度，谷子球形度大部分位于 79% ~ 85% 之间[14]。因其球度较高，可忽略形状对理论分析的影响，故取直径为 2.15 mm 的圆形替代谷种平面模型。

表 1　大穗金谷三轴尺寸

Tab. 1　Triaxial dimensions of big spike Golden Valley

参数	平均值	标准差
长度/mm	2.30	0.23
宽度/mm	2.00	0.20
高度/mm	1.50	0.17
球度/%	82.77	0.19

1.2.3　误差分析

根据式(1)，若考虑谷子半径影响，则出现漏播时，检测指标 K_m 计算式为

$$K_m=\frac{\left|\pi\left(1.5r'+\frac{2.15}{2}\right)^2-\pi\left(r'+\frac{2.15}{2}\right)^2\right|}{\pi\left(r'+\frac{2.15}{2}\right)^2}\times 100\% \tag{4}$$

当出现重播时，检测指标 K_r 计算式为

$$K_r=\frac{\left|\pi\left(0.5r'+\frac{2.15}{2}\right)^2-\pi\left(r'+\frac{2.15}{2}\right)^2\right|}{\pi\left(r'+\frac{2.15}{2}\right)^2}\times 100\% \tag{5}$$

由式(4)、(5)可知，K 随理想化谷子间距的变化而变化，结合农艺要求和实际可能出现的穴内谷子过于密集和稀疏情况，取 r' 为 20 ~ 80 mm，得出对应 K，并计算 K 相对误差如图 3 所示。

由图 3 可知，当理想化谷子间距为 20 ~ 80 mm 时，K_m 相对误差低于 6.04%，随着理想化谷子间距逐渐增大，相对误差逐渐减小，并趋于无穷小，即 K_m

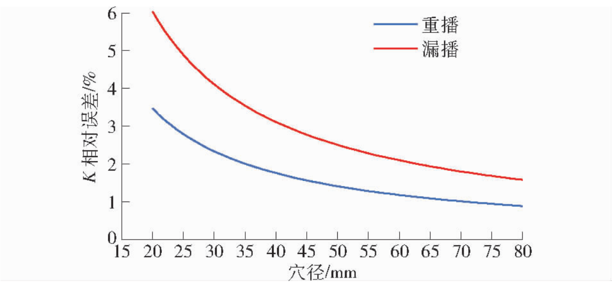


图 3 穴径对漏播、重播情况下的 K 相对误差影响

Fig. 3 Influence of hole diameter on relative error of K value in case of missing and rebroadcast

会逐渐增大，并趋于 125%，；K_r 相对误差低于 3.47%，随着理想化谷子间距的逐渐增大，相对误差逐渐减小，并趋于无穷小，即 K_r 逐渐增大，并趋于 75%。

由此可见，针对谷子精量穴播成穴性检测时，在合理穴径下，谷子半径对最终所做外接圆的影响可以忽略不计，故在后续试验和成穴性检测中，K_m 取 125%，K_r 取 75%，即单穴内谷种 K 为 75% ~ 125% 时，可以判定为该穴成穴性良好，否则为成穴性较差。

2 穴径测量算法

2.1 算法流程

对背景图像和谷子图像进行灰度处理后完成图像拆分，对拆分后的图像进行反色二值化处理，以此获得对比度高的谷子图像，利用边界提取算法对谷子边界点进行提取，完成对图像的预处理[15]。最后通过改进 Welzl's 算法提取穴径，改进 Welzl's 算法使用基于向量的外包络点提取法和最小二乘拟合圆法完成对谷子边界点的筛选，从而减少做圆时迭代过程，使用 Welzl's 算法对筛选点进行最小外接圆求取[16]，并记录半径，即是穴径。

2.2 图像预处理

由于图像采集区中拍摄装置处于静止状态，灯光对采集图像产生的影响可以忽略不计，且拍摄背景为传送带，无干扰点对图像产生影响，故不作图像的特殊处理。对于图像预处理部分，采用背景差分法，可有效降低复杂度，提高计算，同时增强系统的鲁棒性效率[17]。首先对图像采集区进行 3 次无落种情况图像采集，利用 Matlab R2016a 对 3 幅图像进行平均值计算，生成平均图像，将平均图像进行灰度化处理[18]，作为初始背景图像，像素为 $Z(x,y)$，再对落种图像进行采集并进行灰度处理，像素为 $Z'(x,y)$。

对背景图像和当前谷子落种图像的灰度图像作灰度值相减，并取绝对值，计算式为

$$I(x,y) = |Z'(x,y) - Z(x,y)| \tag{6}$$

T 设为前景灰度阈值，若当前帧像素 $I(x,y) > T$ 则为前景点，反之为背景点。图像拆分前后结构如图 4 所示。

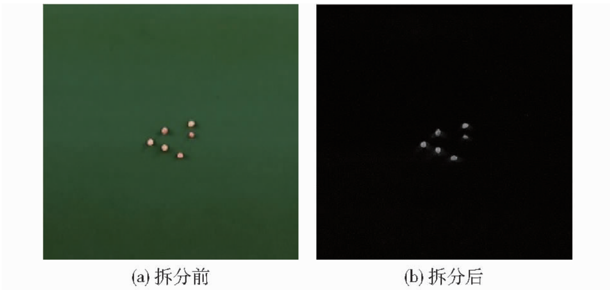


图 4 拆分法前后谷子对比

Fig. 4 Diagram of foxtail millet before and after splitting method

为了更好地区分谷子与背景，将图像拆分后进行反色二值化处理。由于该试验场景所受干扰因素较为稳定，进行拆分后的图像中目标物与背景分离较为明显，目标物周围与背景过渡平滑，为了更好地保留谷子的轮廓，采用固定的阈值，通过对多组试验图像进行综合分析，最终确定阈值为 55，将原始灰度图像中小于等于阈值的像素点设为黑色(0)，大于阈值的像素点设为白色(255)[19]。反色二值化后图像如图 5a 所示，该图的有效视域如 5b 所示。

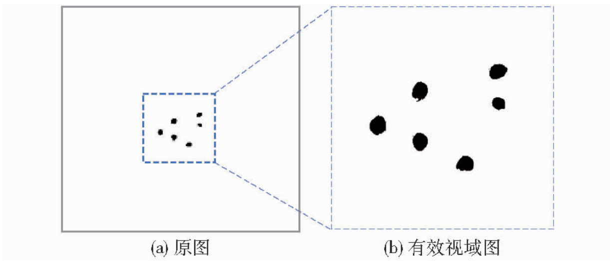


图 5 反色二值化图

Fig. 5 Millet seed picture obtained by splitting method

2.3 轮廓点提取

对处理后的图像进行边界提取，常用边界提取有基于一阶导数的算子，如 Prewitt 算子、Sobel 算子；基于二阶导数的算子，如 LoG 算子[20]；基于梯度的算子，如 Canny 算子[21]。4 种算子边界提取结果如图 6 所示。由图 6 可知，LoG 算子虽然对图像的高频和低频部分变化都具有较好响应，但易出现多个边缘(图 6a)，Sobel 算子(图 6b)、Prewitt 算子(图 6c)都考虑邻域信息，平滑部分权值各不相同，先做加权平滑处理，再做微分运算，虽然具有一定的抑制噪声能力，但不能完全排除出现的虚假边缘，图像噪声点含量增加过多[22]。Canny 算子(图 6d)可准确地识别出图像中细微边缘，有效去除噪声点且边缘连接较为平滑，故使用此种方法进行边界提取。

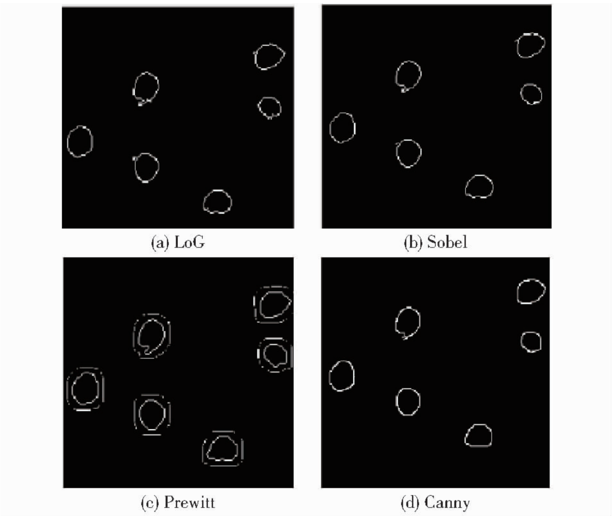


图 6　4 种算子边界提取效果

Fig. 6　Four kinds of algorithms boundary extraction effect

通过 Canny 算法输出的为二值图像，即只包含 0 和 1 两种像素，其中边缘部分为 1，背景部分为 0。通过 Find 函数提取特征点，查找矩阵中像素为 1 的特征点，并返回这些元素在矩阵中的索引，将其储存在建立的点集矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中，特征点提取示意图如图 7a 所示，单个谷子取点示意图如图 7b 所示。

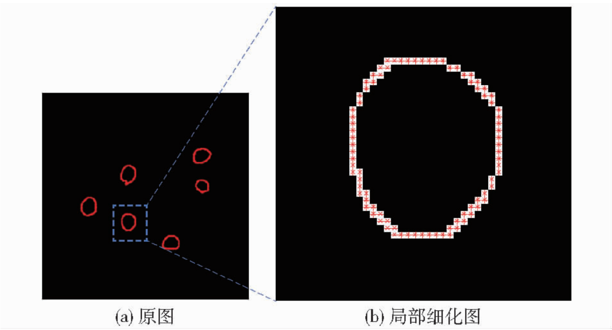


图 7　单粒种子特征点提取

Fig. 7　Extraction of single seed feature points

2.4　改进 Welzl’s 算法提取穴径

2.4.1　算法原理

对多组穴粒数为 6 的试验图像所建立的点集矩阵 $\boldsymbol{M}$ 进行统计分析，发现平均每个点集矩阵中含有约 500 个坐标，单个谷子所含元素最低达到 80 个，若出现特殊形状谷种，所含坐标将达到 100 多个。通过对单穴谷子包含的近 500 个坐标分析，不难发现，这些点的排列虽然是离散的，但点的特征性较强，均呈 6 个圆环分布。

目前，对于给定的点集矩阵，求取最小外接圆算法较为成熟，针对不同类型点集，算法原理也各不相同，Welzl’s 算法也称随机增量算法，时间复杂度为 $O(n)$，通过递归方式逐步确定圆的中心和半径，最终得到覆盖所有点的最小圆。由最小外接圆性质可知，最终可以作为形成最小外接圆的有效元素不超过 3 个，为了降低迭代计算次数，提高算法鲁棒性和系统实时性处理能力，筛选有效元素具有一定意义[23]。因此，本文设计了外包络点提取与 Welzl’s 算法结合的改进策略：在算法中添加关键点的筛选，目的是为了减少参与最小外接圆求取过程中点的数量，从而更加快速求取谷子外部轮廓二维点的最小外接圆[24]，同时直接全局搜索可能受噪声干扰，通过提取关键点可有效剔除内部噪声，聚焦于边缘形态。

2.4.2　外包络点搜寻

对于二维平面上的一个点集矩阵，取其中任意 2 点构建一条直线，如果该点集矩阵中其它点都落在该直线上或其一侧，则该直线称为包络线，确定该包络线的 2 点称为外包络点[25]。点集外包络线和外包络点具有唯一性，且根据点集外包络模型和最小外接圆的定义，可以利用反证法证明点集最小外接圆由该点集的外包络点决定，因此可以利用点集外包络点为决定点求整个点集的最小外接圆[26]。

由于点集分布特殊性，需要对包络点初始点进行设定，选择点集中横坐标最小的点构成点集矩阵 $\boldsymbol{M}_1$，此时点集矩阵 $\boldsymbol{M}_1$ 中含有若干横坐标均为相同值的点，记为 x_0，再选择点集矩阵 $\boldsymbol{M}_1$ 中纵坐标最小的点，记为 y_0，记该点为初始点 m_0，坐标为 (x_0, y_0)，此时初始点 m_0 左侧和下方均没有点，再设定一个初始向量点记为 m_1，坐标为 (x_0, y_0+1)，记向量为 $\boldsymbol{L}_0$ 初始向量。

以外包络初始点 m_0 为起点分别向点集矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中的其它点构建向量形成向量 $\boldsymbol{L}_x$，则该向量与初始向量的夹角 θ 取值范围为 $0 \leqslant \theta < \pi$。取向量夹角 θ 最小时对应的点作为包络点压入栈内，记栈内点集矩阵为 $\boldsymbol{E}_M$。将新入栈的点对应向量作为新的初始向量，循环操作，直至遍历完所有点，若出现共线情况则均压入栈内，作为关键外包络点。图 8 为依次连接所有外包络点示意图。

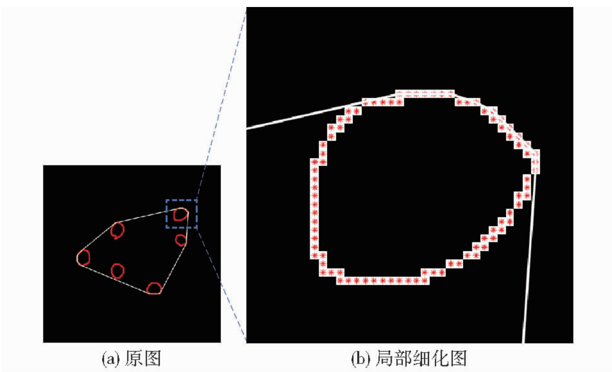


图 8　外包络点连接示意图

Fig. 8　Outer envelope point connection diagrams

这种方法保证了栈内点一定是点集矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的最外层，并且通过向量计算，可以高效地处理大量点

的情况。通过预试验结果表明,由于谷子外形的不确定性以及落下时位置不同,点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 中点的数量占点集矩阵 $\boldsymbol{M}$(12 ±4)%。

求取最小外接圆随机增量算法是以迭代的方式实现,过多的迭代会消耗系统资源,为了充分发挥随机增量算法高效性并减少系统资源消耗,需要将点集的外包络点进一步精简。

2.4.3 关键外包络点提取

为了进一步减少参加最小外接圆点的数量,可结合最小二乘拟合圆,对点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 进行筛选[27]。由于进行了外包络点的筛选,点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 分布比较规则、均匀,此时采用最小二乘圆法对点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 进行筛选所需时间可忽略不计,且在计算过程中,误差平方和的初始值较小,因此优化过程调整幅度较小,收敛也会更快,计算次数也会显著减少。若直接将所得最小二乘圆作为结果,则会出现特殊谷子分布时导致的精度低等问题,故采用最小二乘拟合的方式对点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 进行筛选。

点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 均匀地分布在最小二乘圆的圆内、圆上和圆外。经试验验证,对于谷种这种近似圆形的自然物体,其最小外接圆的决定点均分布在最小二乘拟合圆的外部,故可简化筛选策略,去除圆内和圆上的所有点,只保留圆外的点,通过计算点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 内点与最小二乘圆心的距离,与最小二乘圆半径比较,从而完成关键外包络点的提取。该部分求取的时间复杂度为 $O(kn)$,k 为迭代次数,由于点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$ 中点的分布接近圆形,且点的数量较少,对于 k 为常数时(迭代次数固定),时间复杂度可简化为 $O(n)$。记提取出最小二乘圆外的关键外包络点集矩阵为 $\boldsymbol{P}$,点集矩阵 $\boldsymbol{E}_M$、$\boldsymbol{P}$ 包含关系如图 9 所示。由于只去除了最小二乘圆圆上和圆内点,故对最小外接圆精度不产生影响。

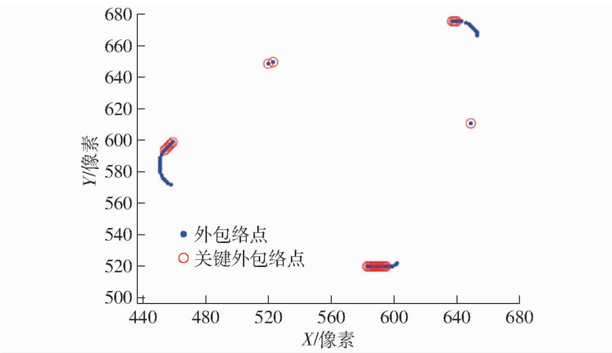


图 9 外包络点及关键外包络点示意图

Fig. 9 Schematic of outer envelope points and key outer envelope points

2.4.4 穴径求取

本文提出的改进策略在于预处理阶段。通过引入凸包提取与最小二乘筛选,简化了输入点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的规模。因此,在最终求解阶段,直接应用标准 Welzl's 算法即可在极短时间内得到精确解,而无需修改算法内核点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 最小外接圆包含点集内所有点,且最多只由点集内 3 个点决定,Welzl's 算法通过递归过程不断选择和更新外接圆,直到满足下述条件为止。算法基线条件:如果点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 为空,或者边界点集中点数达到 3 个,则外接圆由这些点确定,算法返回此圆。算法的递归步骤:随机选择一个点 $p_0 \in \boldsymbol{P}$,并从点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中去掉这个点,使用递归计算剩余点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和当前边界点集的最小外接圆,如果点 p_0 在当前圆内,则该点不影响圆的构造,递归继续返回当前圆;如果点 p_0 不在当前圆内,则该点必为外接圆的一部分,加入边界点集中,并递归计算新的包含 p_0 外接圆。

完成递归计算后,如果点集中某个点不在当前的圆内,则该点一定是外接圆的边界点之一。通过递归,最终选择的边界点集会构成唯一的最小外接圆,保证了这个圆的边界点是局部最优,即没有任何其他圆比这个圆包含所有点且半径更小。

对于关键外包络点集矩阵 $\boldsymbol{P} = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n]$ 的最小外接圆,由最多 3 个不共线的点确定,这些点构成圆的边界,最小外接圆可以通过求解这 3 点外接圆得到。记 3 个点坐标分别为 $p_1 = (x_1, y_1)$,$p_2 = (x_2, y_2)$,$p_3 = (x_3, y_3)$,最小外接圆圆心坐标和半径计算式为

$$C_x = \frac{1}{\boldsymbol{D}}\begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$C_y = \frac{1}{\boldsymbol{D}}\begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$R = \frac{1}{2\boldsymbol{D}}\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1^2 + y_1^2 \\ x_2 & y_2 & x_2^2 + y_2^2 \\ x_3 & y_3 & x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{D} = 2\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中 $\boldsymbol{D}$——系数矩阵

C_x——圆心横坐标值

C_y——圆心纵坐标值

R——最小外接圆半径

求取结果如图 10 所示,所得半径即为穴径。提取关键外包络点后采用 Welzl's 算法显著降低了迭

代计算次数，提高了系统实时性处理能力，特别是在连续在线检测场景下。也可避免离群点对该算法干扰，有效地避免了 Welzl's 算法弊端，且关键外包络点集矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中点的数量满足形成最小外接圆关键点数量。

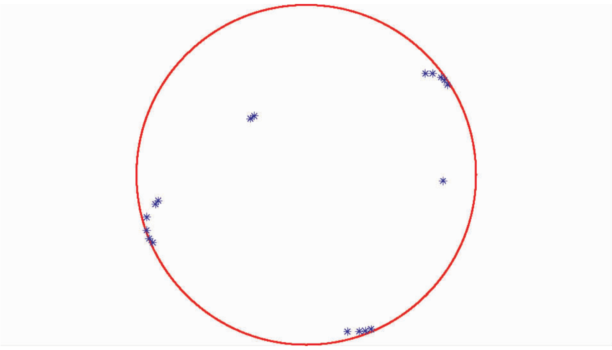


图 10　关键外包络点求取最小外接圆

Fig. 10　Minimum circumferential circle obtained for key outer envelope points

3　成穴性检测系统设计

3.1　硬件搭建

基于 K 值法的谷子穴播成穴性检测系统主要由 JPS－16 型播种性能检测试验台、谷子穴播勺链式导种装置、CCD 工业相机、计算机等组成，试验系统如图 11 所示。

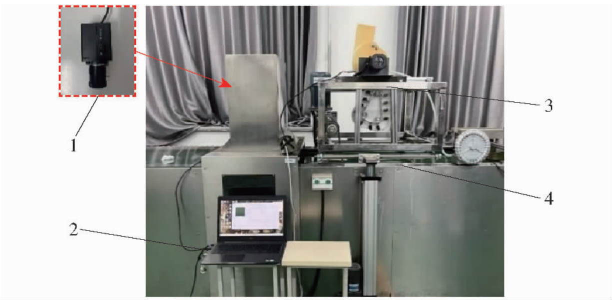


图 11　成穴性检测系统

Fig. 11　Evaluation device for cavitation performance

1. 相机　2. 计算机　3. 谷子穴播勺链式导种装置　4. JPS－16 型播种性能检测试验台

在谷子成穴性检测前，首先对 JPS－16 型播种性能检测试验台的传送带进行涂油处理，将谷子穴播勺链式导种装置安装至台架上，调整排种器的相关参数，将相机安装至图像采集区的暗箱内，调整好拍摄区域，打开成穴性检测交互界面，设置相关参数后启动传送带，待传送带运行速度均匀时打开排种器。试验时对每穴谷子图像进行采集并传入检测系统，系统对图像进行预处理后完成最小外接圆的提取，并记录相关数据，利用 K 值法对数据进行分析处理，完成成穴性的检测。

图像采集相机采用 PCBA－imx577 型彩色 CMOS 相机，分辨率为 1 200 万像素，配备低畸变光学镜头；光源为漫反射 LED 环形光源，安装于相机镜头正下方，以消除谷种表面镜面反射并增强与背景传送带的对比度；计算机配置为 Intel Core（TM）i5－8300H CPU@2.30 GHz，内存为 8GB 操作系统 64 位 Windows 11。

图像采集相机通过 USB 3.0 接口与计算机通信，安装高度距传送带平面 240 mm，有效视场校准为 100 mm × 100 mm，根据谷子穴播勺链式导种装置的排种速度、传送带的运行速度和视场范围，计算得出最佳采样频率，从而设定 0.58 s 的时间间隔，确保采样覆盖率且无重叠。

3.2　软件设计

检测系统利用 Matlab R2016a 完成图像预处理、改进 Welzl's 算法求取穴径、K 值法实现穴径检测，检测系统界面采用 Matlab APP designer 工具包设计生成，如图 12 所示。

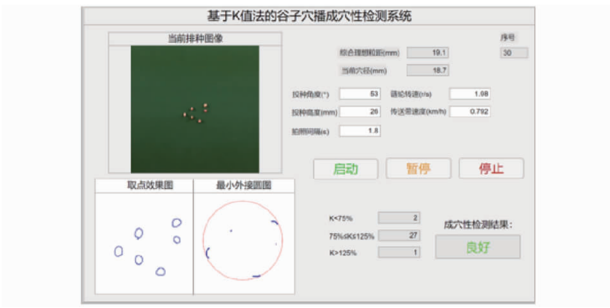


图 12　成穴性检测系统界面

Fig. 12　Interface diagram of acupoint formation detection system

检测界面包含试验前手动输入的相关参数，试验过程生成的当前实际排种图像，对应的取点效果图和最小外接圆图，计算生成的当前序号、综合理想粒距、当前穴径、不同 K 值区间对应个数和成穴性检测结果。

4　试验

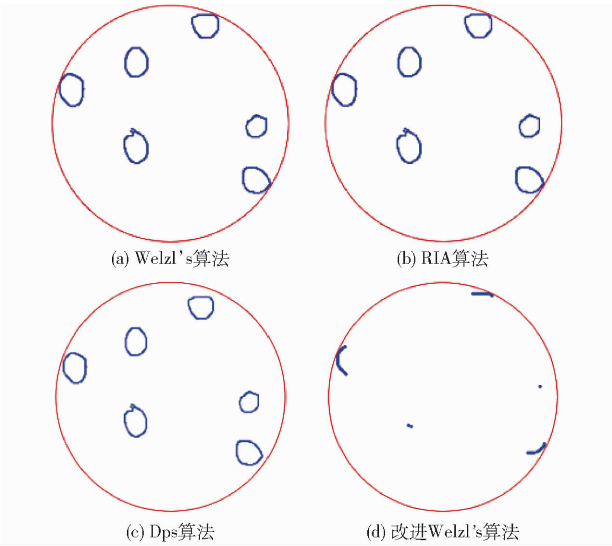
为验证改进 Welzl's 算法精准性和谷子成穴性检测方法实用性，开展改进 Welzl's 算法性能检测试验和成穴性检测试验。

4.1　改进 Welzl's 算法性能检测试验

为了验证该算法在同类型获得最小外接圆算法中的高效性，从而为多样本连续作业奠定基础。试验在黑龙江八一农垦大学工程学院播种装备实验室开展，试验对谷子穴播勺链式导种装置在 JPS－16 型播种性能检测试验台的实际播种情况进行检测，设计播量为 6 粒/穴，采集 10 组试验图像，待试验图像传入系统后，进行图像预处理，并提取谷子外部轮

廓点,获得性能检测结果。

分别以常规 Welzl's 算法、BERG 等设计的 RIA 算法、对偶决策近似算法 Dps 与改进 Welzl's 算法进行试验。Welzl's 算法作为早期出现的算法,可准确获得最小外接圆,算法的逻辑相对简单,易于实现,时间复杂度仅为 $O(n)$,对处理小样本点集有着不错的效果,但对于较大且复杂的点集运行速度会大幅降低,故本文在求取完关键外包络点后采用此种算法;RIA 算法也可准确做出最小外接圆,平均情况下具有较高的效率,时间复杂度为 $O(n\lg n)$,该算法的递归结构使得其在实现上较为清晰,适合处理较大的点集;Dps 算法通常能提供良好的近似解,在时间复杂度上通常表现较好,为 $O(-n\mathrm{lb}\varepsilon)$,其中 ε 为最小包围圆的误差容忍度,综合考虑检测精度与实时性需求,本文将误差控制阈值设定为 0.01,该算法为近似算法,能够在合理的时间内找到近似解,虽然不能精准做出最小外接圆,但对于本文的样本点集,近似解与标准圆的圆度误差极小。4 种算法所做最小外接圆效果如图 13 所示。



(a) Welzl's算法　(b) RIA算法　(c) Dps算法　(d) 改进Welzl's算法

图 13　各算法所做最小外接圆

Fig. 13　Minimum circumcircle plot made by each algorithm

由图 13 可知,因 Dps 算法求取的是近似解,所形成的圆心和半径与其他算法所得结果略有偏差,其余 3 种算法所做最小外接圆大小均相同,因而说明本文改进 Welzl's 算法准确性。

为验证算法在实际检测系统中的效率,在 Matlab R2016a 环境下对不同算法进行了对比测试。选取 10 组典型谷种图像,提取轮廓点集,4 种算法对 10 组试验点集做最小外接圆的运行时间和时间压缩比的试验,结果如表 2 所示。TCR_1 表示 Welzl's 算法相对于改进 Welzl's 算法的时间压缩比,TCR_2 表示 RIA 算法相对于改进 Welzl's 算法的时间压缩比,TCR_3 表示 Dps 算法相对于改进 Welzl's 算法的时间压缩比。

时间压缩比 TCR 计算式为

$$TCR = \frac{T_1}{T_2} \tag{11}$$

式中　T_1——原始时间,ms

T_2——压缩后时间,ms

表 2　改进 Welzl's 算法的性能检测试验结果

Tab. 2　Performance test results of improved Welzl's algorithm

序号	运行时间/ms				时间压缩比		
	Welzl's 算法	RIA 算法	Dps 算法	改进 Welzl's 算法	TCR_1	TCR_2	TCR_3
1	582.4	60.1	45.2	35.1	16.59	1.33	1.29
2	576.8	62.3	44.8	34.9	16.53	1.39	1.28
3	601.2	65.4	48.1	35.5	16.94	1.36	1.35
4	580.1	58.9	43.5	34.8	16.67	1.35	1.25
5	565.5	61.2	46.2	35.2	16.07	1.32	1.31
6	579.3	59.8	44.0	35.0	16.55	1.36	1.26
7	588.7	63.5	47.3	36.1	16.31	1.34	1.31
8	572.1	60.7	45.5	34.7	16.49	1.33	1.31
9	550.4	57.2	42.8	34.6	15.91	1.34	1.24
10	585.6	61.9	45.9	35.3	16.59	1.35	1.30

从表 2 可看出,Welzl's 算法作为精确解的基准,在 Matlab 环境中,直接处理所有轮廓点集时,由于递归深度较大且解释器执行效率限制,运算耗时较高,改进 Welzl's 算法将输入数据规模降低约 10%,极大地规避了递归深所产生的问题,在时间代价上至少提升 15 倍,同等运行结果下运行速度提升明显;RIA 算法基于重排序的增量算法,逻辑清晰,但在处理非均匀分布点集时运算开销较大,改进 Welzl's 算法在时间代价上能提升 1.3 倍以上,同等运行结果下运行速度虽略有提升,但显著降低了迭代计算次数,提高了系统的连续实时性处理能力;Dps 算法通过牺牲 1% 的理论精度换取了计算速度,但改进 Welzl's 算法在时间代价上仍提升 1.2 倍以上,且所做最小外接圆更为精准。改进 Welzl's 算法较其他 4 种算法相比,时间压缩比均大于 1,最高可达 16.94,且准确性良好,为其在系统中运行提供了可行性支撑。

4.2　成穴性检测试验

为了验证成穴性检测系统的可行性,通过对谷子穴播勺链式导种装置排出的大穗金谷进行成穴性检测,将试验结果与谷子穴播勺链式导种装置作者所得出的穴径合格率进行分析对比。

试验开始前对谷子穴播勺链式导种装置进行相关参数设置,投种角度设为 53°、投种高度设置为 26 mm、链轮转速设为 1.98 r/s,设传送带运行速度

为 0.792 km/h，该参数为谷子穴播勺链式导种装置的性能最佳参数，开启传送带、启动导种装置，共进行 10 组试验，每组连续采集 100 幅图像，将 1 000 幅试验图像包含的实际排种情况传入系统，通过改进 Welzl's 算法提取外接圆，并测量外接圆半径，1 000 幅图像的外接圆半径平均值为 19.1 mm，即该谷子穴播勺链式导种装置在上述参数组合设置情况下综合理想粒距为 19.1 mm，统计每组试验图像 K 小于 75%、大于 125% 以及 75% ~125% 3 个区间个数，结果如表 3 所示。

表 3　成穴性检测结果

Tab.3　Online evaluation of cavitation performance

组数	K 值区间个数/个			成穴质量占比/%	
	$0<K<75\%$	$75\%\leqslant K\leqslant125\%$	$K>125\%$	良好	较差
1	12	82	6	82	18
2	7	83	10	83	17
3	11	80	9	80	20
4	5	87	8	87	13
5	9	85	6	85	15
6	9	83	8	83	17
7	10	79	11	79	21
8	9	84	7	84	16
9	8	83	9	83	17
10	11	80	9	80	20
总计	91	826	83	82.6	17.4

由表 3 可知，10 组试验中 K 为 75% ~125% 试验组数占试验整体 82.6%，重播情况占试验总体 9.1%，漏播情况占试验总体 8.3%。文献[13]中谷子穴播勺链式导种装置试验所得出的穴径合格率为 97.34%，产生差异化的原因一方面是本文考虑了排种过于密集的情况，另一方面是选择勺链式导种装置在特定参数设置情况下所得的平均谷子穴径作为参考值，并未单纯使用穴径小于 5 cm 作为参考值。排种性能良好的试验样本数占试验总体 82.6%，也可以说明谷子穴播勺链式导种装置在该参数组合设置情况下的排种稳定性较好，且成穴性良好。

5　结论

（1）提出了一种基于 K 值法的谷子穴播成穴性检测方法。通过将每穴谷子最小外接圆与理论谷子间距所做的外接圆对比，当 $75\%\leqslant K\leqslant125\%$ 时，说明当前穴的成穴性良好，成穴性良好的组数占试验总体组数 82.6% 以上，则说明该排种器所排出种子的成穴性良好。

（2）改进 Welzl's 算法性能检测结果显示，与 Welzl's 算法、RIA 算法、Dps 算法相比，时间压缩比均大于 1，最高可达 16.94，显著降低了迭代计算次数，提高了系统连续实时性处理能力，且所得最小外接圆与 Welzl's 算法和 RIA 算法获得最小外接圆的结果保持一致，准确性良好，实现了谷子穴播中穴径测量。

（3）设计了一种谷子穴播成穴性检测系统。对谷子穴播勺链式导种装置进行成穴性检测试验，结果表明，K 为 75% ~125% 的试验组数占试验总体 82.6%，重播情况占试验总体 9.1%，漏播情况占试验总体 8.3%，说明该系统具有一定的可操作性，对成穴性检测具有一定贡献。

参　考　文　献

[1] 陈涛，衣淑娟，李衣菲，等. 北方谷子物料特性的试验研究[J]. 中国农机化学报，2021，42(5)：75 -80.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Experimental study on the material characteristics of northern millet[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 75 -80. (in Chinese)

[2] 侯华铭，崔清亮，张燕青，等. 2BZ -2 型谷子精少量播种机的研制[J]. 农业工程学报，2017，33(13)：16 -22.
HOU Huaming, CUI Qingliang, ZHANG Yanqing, et al. Development of 2BZ -2 type fine and small-amount seeder for foxtail millet[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 16 -22. (in Chinese)

[3] 李衣菲，衣淑娟，孙志江，等. 窝眼式谷子穴播排种器充种性能研究[J]. 农机化研究，2021，43(11)：57 -63.
LI Yifei, YI Shujuan, SUN Zhijiang, et al. Study on the filling performance of the seed-filling device of socket-roller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 57 -63. (in Chinese)

[4] 曹叶，郭文松，赵鹏飞，等. 基于 LabVIEW 的穴播器排种自动监测系统[J]. 农机化研究，2022，44(11)：135 -141.
CAO Ye, GUO Wensong, ZHAO Pengfei, et al. Design of automatic detection system for cotton drill seed metering performance based on LabVIEW[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 135 -141. (in Chinese)

[5] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 165 -172.

[6] 贾洪雷，路云，齐江涛，等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J]. 农业工程学报，2018，34(19)：28 -39.
JIA Honglei, LU Yun, QI Jiangtao, et al. Detecting seed suction performance of air suction feeder by photoelectric sensor combined with rotary encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 28 -39. (in Chinese)

[7] 周利明，李树君，张小超，等. 基于电容法的棉管籽棉质量流量检测[J]. 农业机械学报，2014，45(6)：47 -52.
ZHOU Liming, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 47 -52. (in Chinese)

[8] QI J T, JIA H L, LI Y, et al. Design and test of fault monitoring system for corn precision planter[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6): 13-19.

[9] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 27-37. (in Chinese)

[10] KARAYEL D, WIESEOFF M, OZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.

[11] 韩子乐,刘占良,赵晓顺,等. 一种关于多粒穴播的成穴性能检测方法的研究[J]. 农机化研究,2017,39(5):100-105.
HAN Zile, LIU Zhanliang, ZHAO Xiaoshun, et al. The research of detection method about multi grain bunch planting's hole forming performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 100-105. (in Chinese)

[12] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):83-94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83-94. (in Chinese)

[13] 衣淑娟,孙亭瀚,陈涛,等. 谷子穴播机勺链式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):39-52.
YI Shujuan, SUN Tinghan, CHEN Tao, et al. Design and test of spoon chain seed guide device for grain hole seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 39-52. (in Chinese)

[14] 尹文庆,赵璐,李骅,等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):68-76.
YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 68-76. (in Chinese)

[15] 奚小波,赵杰,史扬杰,等. 基于改进凹点分割的小麦播种籽粒落种分布在线检测方法[J]. 农业机械学报,2024,55(7):75-82.
XI Xiaobo, ZHAO Jie, SHI Yangjie, et al. Online detection method for wheat seeding distribution based on improved concave point segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 75-82. (in Chinese)

[16] WELZL E. Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids)[C]// New Results and New Trends in Computer Science. Graz, Austria, 1991.

[17] 李艳肖,胡雪桃,张芳,等. 基于高光谱技术的菌落图像分割与计数[J]. 农业工程学报,2020,36(20):326-332.
LI Yanxiao, HU Xuetao, ZHANG Fang, et al. Colony image segmentation and counting based on hyperspectral technology[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 326-332. (in Chinese)

[18] 刘建英,刘飞,张鹏举. 气吸式免耕播种机排种器监测系统设计[J]. 农机化研究,2015,37(9):143-146.
LIU Jianying, LIU Fei, ZHANG Pengju. Design of monitoring system for air suction seeder metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 143-146. (in Chinese)

[19] 孙滨峰,叶春,李艳大,等. 基于颜色指数与阈值法的稻田图像分割[J]. 中国农业大学学报,2022,27(5):86-95.
SUN Binfeng, YE Chun, LI Yanda, et al. Paddy field image segmentation based on color indices and threshoiding method[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 86-95. (in Chinese)

[20] WANG Cui, LI Yeli, QIU Ali. Comparison research of capability of several edge detection operators[C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Technology and Management Science, 2015: 795-798.

[21] 吴琼,马雷. 一种基于 LoG 算子的量子图像边缘检测算法[J]. 量子电子学报,2022,39(5):720-727.
WU Qiong, MA Lei. A quantum image edge detction algorithm based on LoG operator[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(5): 720-727. (in Chinese)

[22] 庞新华,朱文泉,潘耀忠,等. 基于高分辨率遥感影像的耕地地块提取方法研究[J]. 测绘科学,2009,34(1):48-49,161.
PANG Xinhua, ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, et al. Research on cultivated land parcel extraction based on high-resolutionremote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(1): 48-49, 161. (in Chinese)

[23] 杨雪,张英芝. 圆度误差评定中删点技术的应用[J]. 计量学报,2002,23(1):17-20.
YANG Xue, ZHANG Yingzhi. Application of deleting points method in assessing roundness error[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23(1): 17-20. (in Chinese)

[24] 王小鹏,姚丽娟,文昊天,等. 形态学多尺度重建结合凹点匹配分割枸杞图像[J]. 农业工程学报,2018,34(2):212-218.
WANG Xiaopeng, YAO Lijuan, WEN Haotian, et al. Wolfberry image segmentation based on morphological multi-scale reconstruction and concave points matching[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 212-218. (in Chinese)

[25] 刘伟军,孙明阳,卞宏友,等. 基于机器视觉的激光分区清洗轮廓识别方法[J]. 应用激光,2022,42(11):84-91.
LIU Weijun, SUN Mingyang, BIAN Hongyou, et al. A method of contour identification for laser partition cleaning based on machine vision[J]. Applied Laser, 2022, 42(11): 84-91. (in Chinese)

[26] 干江红,汪洁,许美红. 基于外包络点的最小外接圆误差快速评定方法[J]. 计量学报,2023,44(5):687-693.
GAN Jianghong, WANG Jie, XU Meihong. A fast minimum circumscribed circle error evaluation method based on outer enveloping points[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(5): 687-693. (in Chinese)

[27] 张建华,韩书庆,翟治芬,等. 改进自适应分水岭方法分割棉花叶部粘连病斑[J]. 农业工程学报,2018,34(24):165-174.
ZHANG Jianhua, HAN Shuqing, ZHAI Zhifen, et al. Improved adaptive watershed method for segmentation of cotton leaf adhesion lesions[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 165-174. (in Chinese)