DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2023.03.006

基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势

高振[1, 2], 卢彩云[1, 2*], 李洪文[1, 2], 何进[1, 2], 王庆杰[1, 2], 郭朝阳[1, 2]

(1. 中国农业大学工学院,北京市,100083;
2. 农业农村部河北北部耕地保育科学观测实验站,北京市,100083)

摘要:种子分布信息检测是保证播种机性能的重要前提,为播种质量检测、定深定位施肥、田间除草和收获等作物生长全过程精准高效管理提供基础数据。计算机视觉技术通过从图像和视频数据中提取有意义的信息,并通过分析解释物理现象,在多个领域得到广泛应用。在系统分析现有文献基础上,从技术应用场景、硬件设备、软件处理算法等角度探讨了计算机视觉技术在种子分布信息检测领域的研究进展。研究发现,计算机视觉技术在种子分布信息检测中仍然存在准确性和稳定性的挑战,且种子分布信息检测需要实时性和大规模数据处理能力,而传统的算法和设备难以满足这些需求,数据融合和分析的能力仍然有待提高。种子分布信息的准确检测需要综合利用多种传感器数据,并进行有效的数据处理和分析,以获取更全面和准确的结果。针对上述问题,提出以下建议:首先,深度学习和机器学习算法应用的广泛性是关键,通过利用大规模的标注数据进行模型训练,可以提高算法的准确性和鲁棒性;其次,需要提高算法的适应性,针对不同的土壤条件、种子类型和光照变化进行优化,以确保算法在各种环境下都能有效工作;同时,发展多传感器数据融合技术,通过将图像数据与其他传感器数据(如激光扫描和热红外图像)进行融合,可以提供更全面和准确的种子分布信息。本研究旨在为未来计算机视觉在种子分布信息检测领域的发展提供参考。

关键词:计算机视觉;播种粒距;排种器;导种管;排种器试验台;播种末端
中图分类号:S223.2+3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2023)03-0050-11

高振, 卢彩云, 李洪文, 何进, 王庆杰, 郭朝阳. 基于计算机视觉的种子分布信息检测关键技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 50−60
GAO Zhen, LU Caiyun, LI Hongwen, HE Jin, WANG Qingjie, GUO Zhaoyang. Research progress and the prospect of crucial technology of seed spacing information detection based on computer vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 50−60

0 引言

播种作为农业生产中的重要环节,播种质量直接影响玉米产量,保证播种时的粒距一致性和播深一致性有助于提高播种质量,发挥群体增产优势。随着精准农业的推广和精密播种技术的发展,精密播种已经成为现代农业播种技术体系的主要组成部分[1-2]。精密播种技术能够通过精准控制种子的位置、数量和深度等因素,提高种子发芽率和生长率,从而提高作物的产量和质量[3]。

对播种机播种质量进行实时检测,并在出现问题后及时采取补救措施,是提高播种质量的有效手段,因此播种质量的精准检测是实现精准播种的基础和关键。准确检测播后土壤中的种子分布信息能够在作物生长最初阶段获取位置分布信息,为播种质量检测、定深定位施肥、田间除草和收获等提供基础数据[4-6],是实现作物生长全过程精准高效管理的重要前提。为评估播种质量,国际标准化组织(ISO)制定了标准测试方法ISO 72561(1984)。该方法规定,播种质量主要包括粒距合格指数、粒距变异系数等[7]。粒距是计算粒距合格指数,粒距变异系数,判断重播、漏播的基础参数,对粒距准确检测是评估播种质量的关键。

目前粒距检测常用的方式是将传感器布置在导种管同一截面的不同位置,种子通过监测区域时会遮挡

收稿日期:2023-05-09 修回日期:2023-07-23
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1500902);中国农业大学2115人才工程
第一作者:高振,男,1994年生,山东济南,博士研究生;研究方向为智能农机装备。E-mail: 1248010060@qq.com
*通信作者:卢彩云,女,1986年生,河北沧州人,硕士,副教授,博导;研究方向为保护性耕作。Email: lucaiyun@cau.edu.cn

光线，传感器通过监测该区域的电信号变化，实现种子检测。主要的传感器类型有光电传感器、电容传感器、压电传感器和声学传感器等。其中，光电传感器成本较低、安装方便而得到广泛应用，但存在灰尘和落种冲击的敏感性限制，准确性有待提高[8-9]。电容式传感器简单经济，易于维护，能够进行非接触式的实时测量，但抗干扰能力弱，性能不稳定[10-11]。声学传感器和压电传感器目前仍处于试验研究阶段，在实际播种作业中应用较少[12-13]。

计算机视觉是一门交叉学科，涵盖了多个领域，旨在使计算机系统能够理解和识别视觉信息，其核心任务是从图像和视频数据中提取有意义的信息，并进行分析和解释[14]。计算机视觉技术可以在不接触检测对象的情况下进行检测，避免了传感器可能引入的干扰，且可以实现像素级别的测量和检测，相比于其他传感器的测量方式更为精确，可以提供更加准确的数据。更重要的是，计算机视觉技术可以同时检测多种参数，如颜色、形状、大小等，而其他传感器往往只能检测单一参数。随着计算机视觉技术的不断发展，国内外学者开始探讨将计算机视觉技术用于粒距检测中。

本文综述了近年来计算机视觉技术在种子粒距信息检测方面的应用，介绍了该技术的应用场景、硬件系统及检测算法，并针对现状对基于计算机视觉的种子粒距信息检测技术未来发展进行了展望。

1　计算机视觉技术在粒距检测中的应用概述

计算机视觉检测的基本原理如图 1 所示[15]，主要由计算机、相机和图像识别算法等软硬件系统组成[16]。相机和计算机是主要的功能部件，相机负责图像采集，计算机是图像识别算法载体，负责图像识别算法执行。为实现不同的检测功能，计算机视觉技术所用的相机类型不同，应用场景和图像识别算法也存在差异。

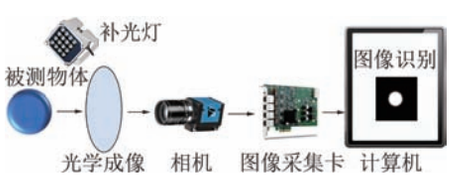


图 1　计算机视觉检测原理

Figure 1　Principle of computer vision detection

1.1　计算机视觉技术中的相机类型

相机是计算机视觉检测系统中的主要功能部件，是图像采集的执行部件，根据不同功能需求和应用场景，目前在精密播种领域应用较多的主要有快速检测的普通相机、拍摄快速运动目标的高速摄像机及大面积种子出苗率检测的无人机。

1.1.1　普通相机

普通相机采集帧率较低，处理器所需要处理的图像数量少，检测速度快。因此，在实际播种作业过程中，普通相机的应用较为广泛。然而，由于机械振动以及种子与相机之间的相对运动等原因，普通相机虽然能检测到种子，但难以实现对种子破损率和种子姿态等功能的检测。董文浩等[17]利用UVC高清摄像头，针对低播量的杂交稻设计了一种播种性能检测与播种量实时调控装置，播种量检测的平均准确率可达到 98.13%。杨洋等[18]通过安装在田间自走机器人上的CMOS机器视觉摄像头采集花生出苗图像信息，采用机器视觉方法获取图像中花生苗的数量和花生苗中心点坐标位置，试验结果表明，花生苗数量检测平均准确率为 95.4%，花生苗株距检测平均误差为 5.35 mm。李朋飞等[19]利用线阵CCD相机扫描播种时的种子图像，并提出了一种基于半软阈值的图像降噪方法。

1.1.2　高速摄像机

高速摄像机与普通相机的主要区别在于其采集帧率高，能够捕捉清晰的高速运动的种子图像，进而实现对种子破损、种子姿态等特征的检测。然而，高帧率会导致图片数量增多，对数据传输和处理提出了更高的要求，在实验室环境中应用较多。如陈进等[20]提出了一种使用高速摄像机采集排种器中高速运动的种子图像的方法，并通过对比图像像素点的面积与设定的单粒种子面积范围来判断种子破碎和重播情况，试验结果表明，相较于人工检测，高速摄像检测的排种合格指数相对误差＜1%，变异系数相对误差＜3%。LI等[21]利用高速摄像机拍摄落到传送带上的种子，通过图像处理方法计算排种器的合格率、重播率以及漏播率。韩国鑫等[22]设计了一种水稻精量穴直播机播种作业监测系统，通过无线通信网络将CCD高速摄像头采集的种穴图像传输到上位机进行图像处理，判断播种数量，检测排种精度和种子破损率，试验结果表明：播量检测最小相对误差为 0.3%，最大误差为 3%。廖庆喜等[23]针对光电传感器无法判断种子破碎等问题，为提高精密排种器的性能检测的真实性和可信性，将高速摄像机与光电传感器相结合进行排种器性能检测。利用高速摄像机可以更准确地检测种子重播率和破碎率，但使用环境较严格，使高速摄像机难以应用到实际的播种作业过程中。

1.1.3　无人机

相较于高速摄像机和普通相机，无人机在种子发芽后的幼苗检测方面具有独特优势。郝嘉永[24]和刘志等[25]使用无人机采集了玉米苗期不同生长阶段的RGB图像，并通过图像处理技术实现了玉米苗的计数。戴建

国等[26]利用无人机遥感平台采集3～4叶期棉花的高分辨率影像,结合图像处理和机器学习技术识别分割棉花目标,构建棉株计数模型,可以监测棉花出苗率、冠层覆盖度以及长势均匀性等苗情信息,试验结果表明:与真实出苗率相比,检测误差仅为0.89%。

朱松松等[27]利用无人机获取棉花出苗期图像,并使用图像处理技术对棉花出苗期图像进行分割与分析,提取棉田苗行、棉花播种数和实际出苗数。陈雯[28]利用无人机获取不同密度和不同播种方式处理的小麦田间苗期图像,通过计算盖度和角点数量,建立了苗数估算模型。赵戈秋[29]利用无人机采集VC期至V2期的大豆苗情图像,结合深度学习技术,对田间作物及作物行分布信息进行检测,实现了田间大豆苗情及杂草分布信息的获取。

张新龙[30]基于无人机搭载可见光成像设备获取玉米苗期影像数据,构建快速、准确的玉米幼苗数量监测算法,提出基于图像监测的玉米出苗质量评价方式,为苗后田间管理与田间决策提供数据参考。LIN等[31]使用无人机采集花生幼苗的视频数据,并提出了一种高效快速的实时花生视频计数模型,准确区分花生幼苗和杂草,并根据视频对花生幼苗进行计数。不同相机的使用场景和优缺点对比如表1所示。

表1 不同相机的使用场景和优缺点对比

Table 1 Comparison of the use scenarios and advantages and disadvantages of different cameras

相机类型	适用场景	优点	缺点
普通相机	实际播种过程中的种子粒距和种子分布信息检测	体积小,易于安装,环境适应性强,且对处理器要求较低	采集帧率低,无法适用于高速运动的种子目标检测
高速摄像机	实验室中排种器排种效果或种子运动状态的理论研究	采集帧率高,可检测高速运动的种子	体积大,对作业环境和处理器性能要求较高
无人机	播后苗期检测,通过植株位置判断播种时的种子位置	作业效率高,且不受播种作业环境影响	出苗后检测,种子位置易受植株叶片影响

1.2 检测算法

计算机视觉技术的检测算法从用于检测和识别物体的简单图像处理算法,到用于模式识别、光学字符识别等领域的特征提取、分类器设计、形状分析等算法,再到用于更高级的图像分析和理解的支持向量机、决策树等机器学习和深度学习算法等。精密播种作为计算机视觉技术应用的一类典型的农业场景,其检测算法的发展也经历了上述的过程。

1.2.1 简单的图像处理

郝嘉永[24]基于无人机采集的不同生长时期的玉米植株图像,通过二值化、膨胀、包围轮廓等方式在农田背景中提取玉米苗信息并进行计数,试验结果表明,按区域计数,该方法准确率可达90%以上,而按垄计数,该方法准确率为80%左右。刘志[32]基于玉米苗期高清图像,通过二值化、腐蚀膨胀等深度优化处理技术得出玉米苗期图像轮廓,计算玉米出苗数量。韩国鑫等[22]利用图像的灰度化处理、中值滤波、膨胀与腐蚀运算和图像二值化提取种子有效点数,试验结果表明,该方法播种量监测的相对误差<3.0%。侯加林等[33-34]开展图像处理技术在大蒜的应用研究,通过图像处理的方法识别蒜种鳞芽方向,具体步骤为:(1)将图像转化为灰度图,并计算蒜种头尾图像的能量、熵、惯性矩等统计特征值;(2)比较蒜种头尾图像的能量、熵、惯性矩和纹理特征,并进行二值化;(3)比较同一阈值下二值图像的黑色区域面积(黑色像素点数目)来识别蒜种鳞芽方向。陈雯[28]通过无人机采集小麦田间苗期图像,利用超绿值分割提取图像中的大部分麦苗,利用形态学腐蚀和膨胀消除图像中的杂质,预测小麦出苗均匀度,试验结果表明,该方法测得均匀度平均误差<10%。张新龙[30]基于无人机采集的玉米苗期影像数据,通过超绿指数提取玉米植株,结合图像对比度增强技术、形态学运算、轮廓检测识别,快速、准确获取玉米出苗数量。

当前关于应用计算机视觉技术进行播种检测的研究主要通过分析种子的大小、形状、颜色等特征,采用灰度化处理、二值化、膨胀、腐蚀等技术,以及形态学运算、轮廓检测等图像处理方法,以实现种子和幼苗的检测和计数。这些算法虽然已经可以实现基本的种子识别功能,但仍存在一些缺点,例如:(1)这些方法需要人工调整参数、阈值等,对于不同的作物种子、幼苗和环境场景需要不同的参数设置;(2)处理结果受到图像质量和采集方式等因素的影响,因此需要对图像质量有高要求;(3)对于复杂场景和不规则形状的农作物,处理难度较大;(4)对于不同类型的农作物和阶段,需要重新设计和调整算法等。

1.2.2 机器学习

薛金利[35]基于无人机遥感平台采集的3～4叶期棉花高分辨率影像,选取GBDI、ExG、NGRDI、NGBDI等8种颜色指标对影像进行颜色特征分析,并结合

Otsu 自适应阈值法实现棉花目标的提取；结合 SVM（support vector machine）构建棉株计数模型，实现了棉花出苗苗情的检测，棉株计数模型分类精度达到 97.17%；通过尺度扩展、目标框维度聚类、多尺度训练等方法对 YOLOv3 网络模型进行了优化，实现了苗期影像杂草识别。杨洋等[18]针对花生出苗图像，采用 K 均值聚类方法和花生苗—土壤自适应分类算法，从背景中提取花生苗图像，试验结果表明：花生苗数量的检测平均准确率为 95.4%，花生苗株距计算平均误差为 5.35 mm。朱松松等[27]通过 K 均值聚类算法分割图像中的地膜，通过超绿灰度化和手动阈值分割算法分割图像中的棉苗，并应用最小二乘法进行苗行检测，试验结果表明：出苗行数检测误差为 0，棉花出苗率检测准确率最高为 90.45%，棉花播种数误差仅为 5%。赵戈秋[29]基于大豆苗情图像，通过简化 YOLOv5s 模型，并在此基础上减去了 20×20 尺度的相关特征层以提升模型性能，实现了大豆叶片识别，优化后的 YOLOv5s 模型检测精度达 91.8%。LIN 等[31]基于无人机采集花生幼苗的视频数据，通过将视觉 transformer 与 CSNet 相结合，以取代原来的 CSNet 主干网，优化 YOLOV5s 网络模型，准确区分花生幼苗和杂草，实现对花生幼苗进行计数，试验结果表明：模型检测准确率为 98.08%。高振等[36]利用在播种作业过程中采集种床图像，并利用深度学习目标检测网络 YOLOX 对种床图像中种子进行检测。

相较于灰度化处理、二值化、膨胀、腐蚀等图像处理方法，机器学习方法可以自适应地学习不同类型的农作物和农作物不同阶段的特征，具有更强的智能化和自适应性；可以识别更复杂的特征，自动调整模型以适应新的种子品种。机器学习算法还可以提高检测算法的准确性和效率，进一步提高精密播种技术水平。机器学习方法在使用前需要大量的标注数据和长时间的训练，对计算机性能要求较高，在精密播种领域的应用还较少。不同检测算法的优缺点对比如表 2 所示。

表 2　不同检测算法的优缺点对比

Table 2　Comparison of the advantages and disadvantages of different detection algorithms

检测算法		优点	缺点
图像处理	灰度化处理、二值化、膨胀、腐蚀等技术，以及形态学运算、轮廓检测	对处理器要求较低	对图像质量要求较高，需人工调整参数和阈值，难以用于复杂场景和不规则形状的图像检测
机器学习	K 均值聚类、支持向量机。YOLO 系列深度学习目标检测算法	准确率和效率较高，智能化和自适应性更强	需要大量的标注数据和计算资源，对处理器性能要求较高

1.3　计算机视觉技术在种子粒距检测领域的应用

根据种子在播种机中的流动过程，以及排种器性能检测、种子运动状态研究和播种机播种质量检测的要求，目前计算机视觉技术在种子粒距检测领域的主要应用方向包括：(1)室内排种器性能检测：将排种器安装在试验台架上，通过电机驱动排种器转动，通过图像处理技术获取不同位置的种子运动状态信息，检测静态状态下的排种器作业性能。(2)大田播种作业检测：综合考虑地表起伏、环境等引起的机械振动条件下，利用图像处理技术检测播种机播种质量。

2　室内排种器性能检测

2.1　种子在排种器内运动的性能检测

为提高排种器工作性能，利用计算机视觉技术对排种盘上的种子进行检测，量化排种器性能，并进行目标性优化。NAVID 等[37]利用高速摄像技术用来评估室内排种试验台的种子间距（图 2）。MANGUS 等[38]使用基于 LabVIEW 的高速成像系统，结合播种机状态、导种管传感器数据和基于视觉的种子测量，以 300 帧/s 的速度实时记录排种器作业过程，以量化其工作性能。模拟高速播种试验表明，突然加速或减速会导致排种误差增大，速度快速变化会导致排种误差增加一倍。针对排种器的排种过程，在种子离开排种器后，利用计算机视觉技术采集种子图像，可以检测种子运动情况和种子位置，实现重播、漏播和播种粒距检测，如图 3 所示。

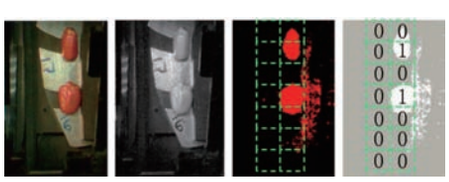


图 2　计算机视觉技术在取种过程中的应用

Figure 2　Application of computer vision technology in the process of seed collection

KARAYEL 等[39]在实验室中使用高速摄像机记录种子从导种管经过到落入种床前的过程，采集种子图像，评估种子间距均匀性和下落速度，并与粘性油带试验台检测结果进行对比。结果表明，高速摄像系统在种子间距均匀性和下落速度检测方面的性能更优。安爱琴等[40]在种子从排种器排出后，使用 CCD 摄像机采集包含原始图像的种子流视频信号，获取帧种子图像，并基于 MATLAB 的 bwlabeln(x)命令识别帧种子数，利

用帧种子数和型孔数的关系推导排种质量模型,进而完成对排种器排种质量的检测。王玉顺等[41]针对条播排种器的性能检测问题,提出一种基于计算机视觉的自动化检测方法,使用CCD相机拍摄种子从排种器排出的图像,对图像进行二值化、降噪滤波和模式识别等处理,通过排种量的分布评估排种性能,试验结果表明,当样本容量达到1 100~2 005时,检测误差仅为3.32%。

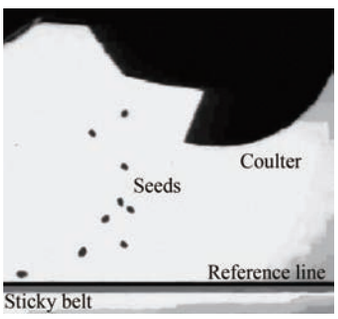


图3 计算机视觉技术在排种过程中的应用

Figure 3 Application of computer vision technology in the seeding process

2.2 涂油皮带排种器试验台性能检测

针对涂油皮带试验台,对落在涂油皮带上的种子进行检测,利用计算机视觉技术获取落在涂油皮带表面的种子图像,计算种子位置和播种粒距,避免人工测量产生的误差,并降低了劳动力需求。种子经过排种器后落在涂油皮带上,以涂油皮带的运动代替实际的田间播种运动。蔡晓华等[42]针对涂油皮带试验台人工测量粒距劳动量大,准确率低等问题,提出了基于计算机视觉原理的排种粒距检测方法,使用镜头朝向涂油皮带的相机获取皮带上的种子图像,采用灰度阈值分割方法提取背景中的种子图像,使用边缘检测法识别种子并测量粒距,以取代传统的人工测量方法,试验结果表明,该方法的测量误差<±1 mm。

马焕菲[43]为实现穴播播种机种子流的视觉检测,基于BST-6型播种机试验台以机器视觉的方式采集序列图像样本,经过图像处理消除背景检测种子算法得到最佳效果的种子像素图像,获得种子数时序样本,由校正过的种子数时序样本统计出种子数频率分布,并由该分布计算漏播率、重播率和粒距合格指数。李润涛[44]通过高速摄像机拍摄落在传送带上的小麦种子,通过图像处理方法得到排种器的合格率、重播率以及漏播率,试验结果表明,粒距测量误差<±1 mm。刘立晶等[45]设计了计算机视觉系统对涂油皮带上的种子进行拍摄,并实时检测出播种粒距,试验结果表明,该方法粒距检测的最大偏差为0.78 mm,粒距的最大相对误差为0.7%。不同检测方法的优缺点对比如表3所示。

表3 不同检测方法的优缺点对比

Table 3 Comparison of the advantages and disadvantages of different testing methods

检测方法	应用场景	优点	缺点
种子在排种器内运动的性能检测	取种、排种过程	节约空间,检测结果不受种子的碰撞弹跳影响	对相机性能和检测算法的实时性要求较高
涂油皮带排种器试验台性能检测	落种过程	结果更加直观,易于测量,且对相机性能要求较低	检测结果受种子与涂油皮带的碰撞影响,且受限于输送带运动特性,无法模拟高速播种作业

3 大田播种作业检测

在实际播种过程中根据相机安装位置不同,计算机视觉技术主要分应用在排种器或导种管检测和播种末端检测中。

3.1 排种器和导种管中的应用

排种器或导种管检测的主要目的是保证种子流能在排种器或导种管中均匀流动以及预测种子粒距[46]。王平岗等[47]在气吸滚筒式排种器中安装了图像传感器,用于检测排种器的重播、漏播情况,这种检测方法可以较早地发现缺种情况,以便于补种装置及时补种。

赵静等[48]公开一种发明专利,在正对输种机构正上方中心位置安装CCD相机采集输种盒中的种子图像,利用机器学习算法进行漏播检测并控制补种装置进行漏播补偿。由于排种器内空间有限,在排种器中安装传感器可能会影响其排种性能。

DEVIN等[49]利用高速摄像技术研究了不同播种量、不同作业速度变化条件下导种管内玉米排种准确性,从而获得电动排种器排种均匀性信息。还可以在导种管中安装相机,如图4所示。



图4 计算机视觉技术在导种管中的应用

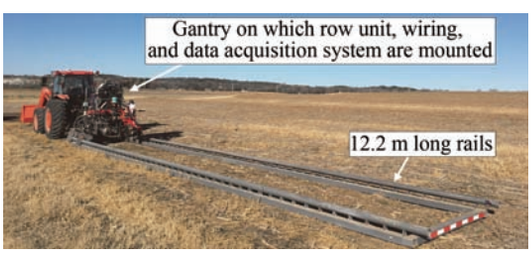
Figure 4 Application of computer vision technology in seed guide tube

该技术可以适用于不同形状的种子，如玉米、向日葵和油菜籽等。还可以识别重叠的种子，区分导种管内灰尘、秸秆碎屑和种子，具有光电式传感器所不具备的优越性。

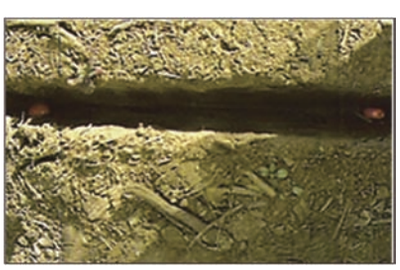
3.2　在播种末端应用

现有研究普遍将两粒种子通过传感器的时间间隔与播种机的作业速度的乘积默认为播种粒距[13]。由于种子通过传感器后，与导种管和土壤发生弹跳碰撞，检测到的粒距与种子在土壤中的实际粒距存在差异，属于间接预测性检测方法。

为此，研究人员尝试在播种末端应用计算机视觉技术进行播种粒距检测。如BADUA等[50]提出了一种基于种床图像的粒距检测方法，该方法利用高速摄像机采集种床中的种子图像，并采用基于特征提取方法的图像拼接算法对采集到的图像进行拼接，实现了种床中的种子粒距检测功能。然而，该研究仍处于概念验证阶段，功能的实现依赖特定的作业环境，如图 5 所示。



(a)田间试验



(b)种距测量

图 5　计算机视觉技术在实际播种中应用的初步验证

Figure 5　Preliminary validation of the application of computer vision technology in practical seeding

李润涛等[44]将光纤传感器和机器视觉相结合，光纤传感器检测排种器充种不佳所导致的漏播，与种床呈 45°安装的相机检测落入种床中的种子数量，如图 6 所示。

台架试验结果表明：当传送带速度达到 0.2 m/s 时，检测准确率高于 93%。LIU 等[51]提出了一种基于图像识别技术的水稻播种成行性评价方法，在采集到种子分布图像后，采用基于均值滤波差分的动态阈值二值化方法(BD-MFD)对种子进行识别，然后获取每个种子中心的像素坐标，结合每个像素代表的实际长度标定结果，计算每粒种子的实际位置坐标，如图 7 所示。

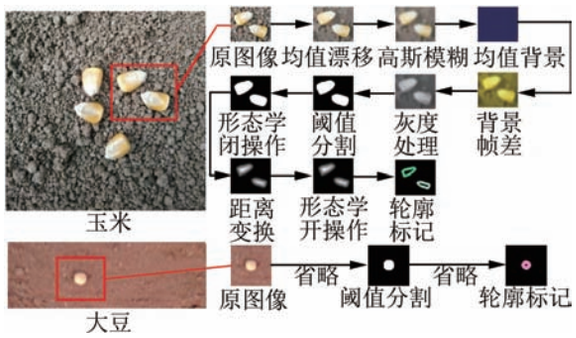
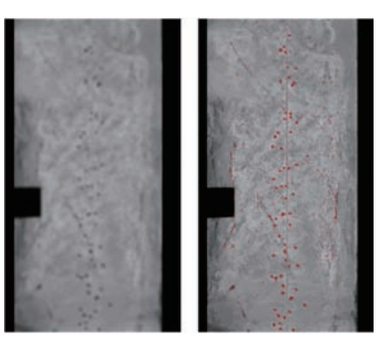


图 6　计算机视觉技术在实际播种中的应用

Figure 6　Application of computer vision technology in practical seeding



(a)水稻种子成行性检测田间试验



(b)水稻种子检测

图 7　计算机视觉技术在水稻成行性检测中的应用

Figure 7　Application of computer vision technology in rice rowing performance detection

试验结果表明，种子坐标识别的平均相对误差为 2.4%。在播种末端进行播种质量检测虽然可以规避种子与导种管和土壤的弹跳碰撞对检测结果的影响，但是，检测结束后种子立即被土壤覆盖，检测系统没有充足的时间将结果反馈到补种装置并控制补种装置进行漏播补偿。

卢彩云等[52]提出了一种基于图像处理的玉米播种质量检测方法，将工业相机与 GPS 定位技术结合，工业相机检测到种床中的种子时，通过 GPS 技术赋予种子位置信息，实现了种子在田间的位置检测。但是 GPS 技术定位误差较大，即便是 GPS-RTK 技术，也存在不可避免的 2.5 cm 的误差，其检测精度有待提高。

4 存在问题

种子分布信息检测的准确性对于农业、生态学和环境保护等领域至关重要。然而,现有研究表明,在种子分布信息检测领域,计算机视觉技术仍然面临着准确性和稳定性方面的挑战。

1)种子形状和检测背景复杂。种子的形状、颜色和纹理等特征在图像中的表现可能存在一定的变化性,并且种子通常分布在复杂多变的环境背景中,增加了种子检测的复杂程度。这给计算机视觉技术的准确性带来了挑战。

同时,传统的基于特征提取和分类器的方法往往依赖于手工设计的特征,对于不同形状和颜色的种子的识别效果可能不尽如人意。而传统的背景建模和分割算法往往难以有效地区分种子和背景之间的差异,导致错误的检测结果。深度学习方法通过端到端的学习从原始图像数据中自动学习特征表示和分类器,可以更好地捕捉图像中的复杂特征,并在一定程度上提高识别的准确性。

2)实时性和数据处理要求高。种子分布信息检测需要具备实时性和大规模数据处理能力,从而应对农田或实验室环境中大量的种子数据。传统的硬件设备在处理大规模数据时往往会面临内存限制和计算资源瓶颈,无法提供及时有效的数据处理能力。可通过使用高性能计算平台(如GPU、FPGA等)来加速数据处理和算法计算,以及通过优化算法和数据结构,减少计算和内存需求,可以提高实时性和大规模数据处理的能力。

3)多传感器数据融合困难。为了准确解释种子分布信息,需要综合利用多种传感器数据,如图像、红外、激光雷达等,以获取更全面和准确的结果。然而,不同传感器数据的异构性和不完整性使得数据融合和分析变得复杂而困难。当前的数据融合算法和技术需要进一步发展,以解决数据对齐、特征融合、误差传播等问题,提高种子分布信息的解释能力和准确度。

综上所述,种子分布信息检测领域在计算机视觉技术方面仍然面临着准确性和稳定性的挑战。为了克服这些挑战,需要进一步研究和发展新的计算机视觉算法和技术,以提高种子检测和识别的准确性,并解决实时性和大规模数据处理的需求。此外,数据融合和分析的能力也需要不断改进,以实现更全面和准确的种子分布信息解释。这将有助于推动农业、生态学和环境保护等领域的科学研究和实践,为农作物种植和生态系统管理提供更有效的支持。

5 总结与展望

在精密播种领域,计算机视觉技术发挥着至关重要的作用,旨在提高作物播种的效率和准确性。然而,尽管计算机视觉技术的发展日新月异,当前在精密播种领域的应用仍存在一些局限性。

为提升精密播种的准确性和效率,未来研究亟需关注深度学习和机器学习算法在该领域的广泛应用,以实现更高水平的种植智能化。未来计算机视觉技术在精密播种领域的展望如下:

1)深度学习算法的广泛应用:未来的研究将更加关注深度学习和机器学习算法在精密播种领域的应用,以实现更高水平的智能化播种。这些先进的算法将有助于提高图像识别和分类的准确性,从而改善播种效果。

2)鲁棒性和适应性的提升:随着技术的不断发展,计算机视觉技术将更好地应对环境变化,如光线和振动等因素。通过改进算法和设备,将提高视觉检测系统在各种环境条件下的鲁棒性和适应性。

3)设备成本降低和普及应用:随着技术进步和设备成本的降低,计算机视觉技术将逐渐从实验室走向实际生产应用,为更多农场提供高效、智能的播种解决方案。

4)多传感器数据融合:未来计算机视觉技术将与其他传感器技术相结合,实现多源数据的融合分析,有助于提供更全面、准确的农业信息,进一步优化播种策略和提高农业生产效率。

5)云计算和大数据支持:随着云计算和大数据技术的发展,计算机视觉技术将能够实时处理大量农业图像数据,有助于及时发现和处理农业问题,为决策者提供有力支持。

参 考 文 献

[1] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38−48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maizeg [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38−48.

[2] 陈建国, 李彦明, 覃程锦, 等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 66−74.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat-planter seeding quantity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 66−74.

[3] 李洪昌，高芳，赵湛，等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报，2014，35(2)：12－16，56.
LI Hongchang，GAO Fang，ZHAO Zhan，et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seedmetering device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2014，35(2)：12－16，56.

[4] 冯慧敏，高娜娜，孟志军，等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：60－67.
FENG Huimin，GAO Nana，MENG Zhijun，et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row－following [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：60－67.

[5] 陈学深，黄柱健，马旭，等. 水稻机械除草避苗控制系统设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版)，2021，51(1)：386－396.
CHEN Xueshen，HUANG Zhujian，MA Xu，et al. Design and test of control system for rice mechanical weeding and seedling-avoiding control [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2021，51(1)：386－396.

[6] 颜丙新，付卫强，武广伟，等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：44－54.
YAN Bingxin，FU Weiqiang，WU Guangwei，et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(2)：44－54.

[7] ISO Standard 7256/1－1984(E)：Sowing equipment-test methods Part 1：Single seed drills (precision drills). Geneva[S].

[8] 苑严伟，白慧娟，方宪法，等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(9)：1－18.
YUAN Yanwei，BAI Huijuan，FANG Xianfa，et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(9)：1－18.

[9] KUMHALA F，KVIZZ，KMOCH J，et al. Dynamic laboratory measurementwith dielectric sensor for forage mass flow determination [J]. Research in Agricultural Engineering，2007，53(4)：149－154.

[10] 周利明，王书茂，张小超，等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报，2012，28(13)：16－21.
ZHOU Liming，WANG Shumao，ZHANG Xiaochao，et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012，28(13)：16－21.

[11] 赵天才. 水稻直播机播量控制与播种监测系统设计与试验[D]. 南京：南京农业大学，2019.
ZHAO Tiancai. Design and experiment of sowing amount control and seeding monitoring system for rice direct seeder[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2019.

[12] KARIMI H，NAVID H，MAHMOUDI A. Online laboratory evaluation of seeding－machine application by an acoustic technique [J]. Spanish Journal of Agricultural Research，2015，13(1)：e0202.

[13] 黄东岩，贾洪雷，祁悦，等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报，2013，29(23)：15－22.
HUANG Dongyan，JIA Honglei，QI Yue，et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidence fluoride piezoelectric film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，29(23)：15－22.

[14] 陈飞飞. 基于特征表示的行为识别方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2015.
CHEN Feifei. Research on action recognition method based on feature representation [D]. Wuhan：Huazhong University of Science & Technology，2015.

[15] 陈书法，冯博，芦新春，等. 智能电控精量播种技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报，2022，43(12)：5－12.
CHEN Shufa，FENG Bo，LU Xinchun，et al. Research progress and prospect of intelligent electronic control precision seeding technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(12)：5－12.

[16] 胡松立. 基于机器视觉的PCB微钻几何参数精密检测技术研究[D]. 上海：上海交通大学，2009.
HU Songli. Machine vision based precise detection of PCB microdrill's geometry parameters [D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2009.

[17] 董文浩，马旭，李宏伟，等. 嵌入式机器视觉的杂交稻低播种量检控装置设计[J]. 吉林大学学报(工学版)，2020，50(6)：2295－2305.
DONG Wenhao，MA Xu，LI Hongwei，et al. Design of low seeding quantity detection and control device for hybrid rice utilizing embedded machine vision [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2020，50(6)：2295－2305.

[18] 杨洋，苗伟，张铁，等. 基于图像自适应分类算法的花生出苗质量评价方法[J]. 农业机械学报，2018，49(3)：28－35.
YANG Yang，MIAO Wei，ZHANG Tie，et al. Quality evaluation method of peanut seeding based on image adaptive classification algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(3)：

28－35.

[19] 李朋飞，王熙，丁国超，等. 精准播种机粒距检测系统信号与图像处理的研究[J]. 农机化研究，2021，43(6)：20－25.
LI Pengfeia, WANG Xia, DING Guochao, et al. Precision seeder particle distance detection output signal noise reduction and image processing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43 (6): 20－25.

[20] 陈进，边疆，李耀明，等. 基于高速摄像系统的精密排种器性能检测试验[J]. 农业工程学报，2009，25(9)：90－95.
CHEN Jin, BIAN Jiang, LI Yaoming, et al. Performance detection experiment of precision seed metering device based on high-speed camera system [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 90－95.

[21] LI Q, LIN H, XIU Y, et al. The design and development of test platform for wheat precision seeding based on image processing techniques [C]// Computer and Computing Technologies in Agriculture III: Third IFIP TC 12 International Conference, CCTA 2009, Beijing, China, October 14－17, 2009, Revised Selected Papers 3. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 352－358.

[22] 韩国鑫，谭峰，谢秋菊，等. 基于机器视觉的水稻精量穴直播机播种监测系统的研究[J]. 肇庆学院学报，2020，41(5)：55－62.
HAN Guoxin, TAN Feng, XIE Qiuju, et al. Precise dibbling species mechanical sowing rice monitoring system based on machine vision [J]. Journal of Zhaoqing University, 2020, 41(5): 55－62.

[23] 廖庆喜，邓在京，黄海东. 高速摄影在精密排种器性能检测中的应用[J]. 华中农业大学学报，2004(5)：570－573.
LIAO Qingxi, DENG Zaijing, HUANG Haidong. Application of the high speed photography checking the precision metering performances [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004(5): 570－573.

[24] 郝嘉永. 基于无人机RGB图像的玉米播种质量监测与产量分析[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.
HAO Jiayong. Monitoring of maize sowing quality and uniformity analysis of emergence based on UAV RGB image [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[25] 刘志，贺正，苗芳芳，等. 基于无人机的水肥一体化玉米出苗率估算方法与试验[J]. 浙江农业学报，2019，31(6)：977－985.
LIU Zhi, HE Zheng, MIAO Fangfang, et al. Method and experiment for estimating emergence rate of water and fertilizer integratedmaize based on drone technology [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(6): 977－985.

[26] 戴建国，薛金利，赵庆展，等. 利用无人机可见光遥感影像提取棉花苗情信息[J]. 农业工程学报，2020，36(4)：63－71.
DAI Jianguo, XUE Jinli, ZHAO Qingzhan, et al. Extraction of cotton seedling growth information using UAV visible light remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 63－71.

[27] 朱松松，陈至坤，张怡. 基于无人机数字图像的棉花出苗信息提取[J]. 现代电子技术，2022，45(1)：61－64.
ZHU Songsong, CHEN Zhikun, ZHANG Yi. Cotton seeding emergence information extraction based on UAV digital image [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(1): 61－64.

[28] 陈雯. 基于无人机图像的小麦出苗均匀度评价[D]. 扬州：扬州大学，2018.
CHEN Wen. Evaluation of seed emergence uniformity of wheat based on UAV image [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.

[29] 赵弋秋. 基于无人机影像的大豆苗情快速检测方法研究[D]. 郑州：河南农业大学，2022.
ZHAO Yiqiu. Research on rapid detection method of soybean seedling growth information based on UAV images [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.

[30] 张新龙. 基于无人机影像的玉米出苗质量评价方法研究[D]. 石河子：石河子大学，2022.
ZHANG Xinlong. Study on evaluation method of maize seedling emergence quality based on UAV image [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.

[31] LIN Y D, CHEN T T, LIU S Y, et al. Quick and accurate monitoring peanut seedlings emergence rate through UAV video and deep learning [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022: 197.

[32] 刘志. 基于无人机玉米出苗率估算与光谱特性的氮素诊断[D]. 银川：宁夏大学，2019.
LIU Zhi. Estimation of maize seeding emergence rate of UAV and nitrogen diagnosis of spectral characteristics [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.

[33] 侯加林，田林，李天华，等. 基于双侧图像识别的大蒜正芽及排种试验台设计与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(1)：50－58.
HOU Jialin, TIAN Lin, LI Tianhua, et al. Design and experiment of test bench for garlic bulbil adjustment and seeding based on bilateral image identification [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 50－58.

[34] 程振，宋井玲，徐洪岑，等. 基于机器视觉的蒜种智能定向技术综述[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(2)：63－70.

CHENG Zhen, SONG Jingling, XU Hongcen, et al. Overview of intelligent orientation technology of garlic seed based on machine vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(2): 63－70.

[35] 薛金利. 基于无人机可见光影像的棉花苗情监测[D]. 石河子：石河子大学,2020.
XUE Jinli. Cotton seedling monitoring based on visible light image of UAV [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

[36] 高振，卢彩云，李洪文，等. 种子位置信息视觉检测系统开沟延时回土装置研究[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：32－42.
GAO Zhen, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Soil backfill delayed opening device for visual detection system of seed position information [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 32－42.

[37] NAVID H, EBRAHIMIAN S, GASSEMZADEH H. Laboratory evaluation of seed metering device using image processing method [J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2011, 2: 1－4.

[38] MANGUS D L, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 314－325.

[39] KARAYEL D, WIESEHOFF M, ÖZMERZI 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: 89－96.

[40] 安爱琴，王玉顺，聂永芳，等. 基于机器视觉的帧种子数识别及其应用[J]. 农机化研究，2013，35(4)：171－173，194.
AN Aiqin, WANG Yushun, NIE Yongfang, et al. Recognition and application of the frame seed number based on machine vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(4): 171－173, 194.

[41] 王玉顺，郭俊旺，赵晓霞，等. 基于机器视觉的条播排种器性能检测及分析[J]. 农业机械学报，2005(11)：56－60，55.
WANG Yushun, GUO Junwang, ZHAO Xiaoxia, et al. Performance detection and analysis of a machine vision based metering mechanism of drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005(11): 56－60, 55.

[42] 蔡晓华，吴泽全，刘俊杰，等. 基于计算机视觉的排种粒距实时检测系统[J]. 农业机械学报，2005(8)：41－44.
CAI Xiaohua, WU Zequan, LIU Junjie, et al. Grain distance real-time checking and measuring system based on computer vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005(8): 41－44.

[43] 马焕菲. 基于VC＋＋排种种子流视觉检测软件的研发[D]. 晋中：山西农业大学，2015.
MA Huanfei. The software development of visual seed flow detection based on VC＋＋ [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2015.

[44] 李润涛. 基于光纤式传感器与机器视觉的双重漏播检测及补种装置研究[D]. 淄博：山东理工大学，2022.
LI Runtao. Research on double missed seeding detection and reseeding device based on optical fiber sensor and machine vision [D]. Zibo: Shandong University of Technology,2022.

[45] 刘立晶，刘忠军，贾振华. 多功能排种器性能试验台的设计与试验[J]. 农机化研究，2012，34(4)：123－126.
LIU Lijing, LIU Zhongjun, JIA Zhenhua. Design and test on multifunctional test-bed for seed metering performance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 123－126.

[46] JI Yao, HU Shuangyan, YAN Wei, et al. Structure design and experiment of air suction double-layer cylinder seedling raising and sowing line [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2022, 3(1): 46－53.

[47] 王平岗，杨德义，吴东林. 基于计算机视觉的气吸滚筒式精密排种器控制系统[J]. 农机化研究，2019，41(7)：202－206.
WANG Pinggang, YANG Deyi, WU Donglin. Control system of air suction drum type precision seed metering device based on computer vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 202－206.

[48] 赵静，马伟童，崔欣，等. 一种基于机器视觉的精量播种自动监测及补种装置[P]. 中国：CN108848782A，2018－11－23.

[49] DEVIN L M, AJAY S, DANIEL F, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 314－325.

[50] BADUA S, SHARDA A, FLIPPO D. Sensing system for real-time measurement of seed spacing, depth, and geo-location of corn: A proof-of-concept study [J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(6): 1779－1788.

[51] LIU W, ZHOU Z, XU X, et al. Evaluation method of rowing performance and its optimization for UAV-based shot seeding device on rice sowing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107718.

[52] 卢彩云，高振，李洪文，等. 玉米播种装置及玉米播种质量检测方法[P]. 中国：CN113079755B，2022－12－13.

Research progress and the prospect of crucial technology of seed spacing information detection based on computer vision

GAO Zhen[1, 2], LU Caiyun[1, 2*], LI Hongwen[1, 2], HE Jin[1, 2], WANG Qingjie[1, 2], GUO Zhaoyang[1, 2]

(1. *College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*; 2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology of Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Seed distribution information detection is an essential prerequisite for ensuring the performance of seeders, providing primary data for precise and efficient management of crop growth processes such as seed quality detection, depth determination and fertilization, field weeding, and harvesting. Computer vision technology has been widely applied in multiple fields by extracting meaningful information from image and video data and analyzing and explaining physical phenomena. Based on a systematic analysis of existing literature, this article explored the research progress of computer vision technology in seed distribution information detection from the perspectives of technology application scenarios, hardware devices, software processing algorithms, etc. The study found that computer vision technology still faces challenges in accuracy and stability in seed distribution information detection, and seed distribution information detection requires real-time and large-scale data processing capabilities. Traditional algorithms and devices are difficult to meet these needs, and data fusion and analysis capabilities still need to be improved. Accurate interpretation of seed distribution information requires comprehensive utilization of multiple sensor data and effective data processing and analysis to obtain more comprehensive and accurate results. In response to the above issues, we proposed the following suggestions: Firstly, the widespread application of deep learning and machine learning algorithms is crucial. By utilizing large-scale annotated data for model training, the accuracy and robustness of the algorithm can be improved; Secondly, it is necessary to improve the adaptability of the algorithm and optimize it for different soil conditions, seed types, and light changes to ensure that the algorithm can work effectively in various environments; At the same time, developing multi-sensor data fusion technology can provide more comprehensive and accurate seed distribution information by fusing image data with other sensor data, such as laser scanning and thermal infrared images. This study aimed to provide a reference for the future development of computer vision in seed distribution information detection.

Keywords: computer vision; seed spacing; seed metering device; seed guide tube; seed metering device test bench; seeding end