doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.043

基于果穗自转与单相机观测的表型采集装置设计与试验

孙　波　陈红明　赵磊磊　王学睿　朱雪婷　皇甫懿　张鸿富　杨琳琳
（云南农业大学机电工程学院，昆明 650000）

摘要：针对传统玉米果穗表型采集装备成本高、设备结构复杂、样本信息提取不全、操作繁琐等问题，提出果穗自转与单相机定点观测的表型采集方案，设计了直立式、多工位、同步采集的玉米果穗表型采集装置。该装置可以放置 10 株玉米果穗，由步进电机驱动转盘公转实现果穗依次拍摄图像，同步带驱动 10 工位果穗自转，完成单株果穗表型采集。封闭式机架排除了外界干扰，保持照度均匀性；相机安装在距离果穗 235 mm 处，以视频流的方式拍摄玉米果穗表型参数，采用全景图像拼接算法展开并识别果穗的穗行数和穗粒数，根据果穗侧面图像测量穗长和穗粗。通过试验得到，基于果穗自转与单相机观测的表型采集装置单穗平均耗时为 38.15 s，穗长测量精度为 98.89%，穗粗测量精度为 97.10%，穗行数统计精度为 97.31%，穗粒数统计精度为 96.19%。

关键词：玉米果穗；采集装置；表型；单相机；旋转
中图分类号：S237　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0492-08　　**OSID**：

Design and Experiment of Phenotypic Acquisition Device Based on Ear Self-rotation and Single-camera Observation

SUN Bo　CHEN Hongming　ZHAO Leilei　WANG Xuerui　ZHU Xueting　HUANGFU Yi　ZHANG Hongfu　YANG Linlin
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650000, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of high costs, complex equipment structure, incomplete sample information extraction, and cumbersome operation associated with traditional maize ear phenotype collection equipment, a phenotype collection scheme utilizing ear rotation and a single camera for targeted observation were proposed. A device for collecting maize ear phenotypes was designed, featuring an upright structure, multiple workstations, and synchronous data collection. This device can accommodate 10 maize ears, with a stepper motor driving a rotating platform to capture images of the ears sequentially, while a synchronous belt driving the rotation of the ten workstations to complete the phenotype collection for each individual ear. The enclosed frame eliminated external interference and maintained uniform illumination; the camera was installed 235 mm away from the maize ear to capture phenotype parameters via video stream. A panoramic image stitching algorithm was used to unfold and identify the number of rows and kernels on the ear, while measurements of ear length and thickness were taken from side images of the ear. Experimental results showed that the average time taken for phenotype collection per ear by using the ear rotation and single camera observation device was 38.15 s, with measurement accuracy for ear length at 98.89%, ear thickness at 97.10%, row count accuracy at 97.31%, and kernel count accuracy at 96.19%.

Key words: maize ear; acquisition device; phenotype; single-camera; rotation

0　引言

玉米果穗的表型信息（如穗长、穗粗、穗行数、穗粒数等[1]）与解析玉米产量形成机制、抗逆性评价密切相关，对于玉米育种、生产管理、品种优化以及指导农业生产实践具有重要意义[2-3]。随着自动

收稿日期：2025-03-25　修回日期：2025-05-27
基金项目：国家自然科学基金项目（32160420）、云南省重大科技专项（202202AE09002103）和云南省农林联合专项（202301BD070001-172）
作者简介：孙波（1970—），女，正高级工程师，主要从事农业工程装备研究，E-mail：1403898755@qq.com
通信作者：杨琳琳（1979—），女，教授，博士，主要从事智能检测及自动控制研究，E-mail：kgy200398@126.com

化技术和图像处理技术的不断发展，通过自动图像采集和图像处理来获取玉米果穗表型参数已成为一种高效、准确的方法[4]。

国内学者针对玉米果穗的表型信息采集装备和方法开展了大量研究工作。宋鹏等[5]设计了玉米高通量自动考种装置，通过流水线作业方式和多相机从不同角度获取果穗的原始图像实现果穗的表型参数获取，需要多机构配合完成，占地面积较大；吴刚等[6]设计了一种玉米果穗自动考种系统，由直线振动喂料机构、气动夹取搬运机构、图像采集平台和计算机等部分组成，成本较高。国内学者在多种作物的表型采集方法研究方面取得了显著进展。赵燕东等[7]提出了多传感器作物表型时间同步采集方法，能够同步采集作物同一时刻的多维表型数据，时间误差较低且稳定性好；徐胜勇等[8]提出了基于单视角 RGBD 图像的柑橘果实三维重建与表型检测方法，针对单视角 RGBD 图像无法完整获取表型信息，采用基于 PFNET 的改进点云补全网络，为玉米果穗、苹果、柑橘等类球形作物表型高通量、无损测量提供了参考；谢立敏等[9]提出了基于 SwinPoinTr 的视角受限下杏鲍菇表型参数测量方法，针对扫描设备视角受限，无法形成完整的杏鲍菇点云，基于 AdaPoinTr 提出了改进的 SwinPoinTr 模型，准确补全了杏鲍菇点云和实现了表型参数的测量。

国外机器视觉在玉米果穗或种子上的应用主要集中在种子损伤与活性检测、黄曲霉污染检测以及种子品种分类与品质分级等方面[10]，与果穗数量性状相关的研究较少。在玉米遗传改良研究领域，表型参数的高效获取始终存在技术瓶颈，具体表现为数据采集效率、获取精度与经济成本间的动态平衡[11]。传统果穗表型信息获取采用劳动密集型作业模式，依赖人工完成果穗性状计量与统计[12]，存在显著的时间与经济成本，人为因素导致数据变异系数居高不下[13]。

基于以上分析，本文提出基于果穗自转与单相机观测的表型采集装置。该装置采用步进电机驱动转盘实现对果穗的依次拍摄，果穗通过穗芯固定，果穗表皮无接触，具有结构简单、成本低廉和果穗表皮损伤率低的特点。相机安装在果穗侧面，以视频流方式采集果穗图像。通过全景图像拼接算法对果穗表面图像进行展开，提取穗行数和穗粒数；同时基于果穗侧面图像测量穗长与穗粗。旨在解决传统玉米果穗表型采集装备存在的成本高昂、设备结构复杂、测量导致的样本损伤率较高、操作过程繁杂等问题。

1　总体方案设计

1.1　整体架构设计

为实现玉米果穗表型参数的快速、自动采集，降低设备复杂度和使用成本，提出一种基于果穗自转与单相机定点观测的采集方案。将待测果穗置于旋转平台上，通过驱动电机控制其匀速旋转，利用固定在支架上的相机采集旋转过程中的果穗圆柱侧面视频流，综合果穗不同侧面信息生成包含完整表面籽粒的果穗表面全景图，计算果穗的穗长、穗粗、穗行数和穗粒数等表型参数。该方法避免了传统多相机阵列或机械臂扫描的复杂布局，仅通过单一传感器与旋转机构的协同实现果穗全景覆盖。装置结构如图 1 所示，由触摸显示屏、箱体、相机、自锁滑轮、核心处理器、步进电机、同步带、驱动模块、隔板和 LED 灯带等组成。

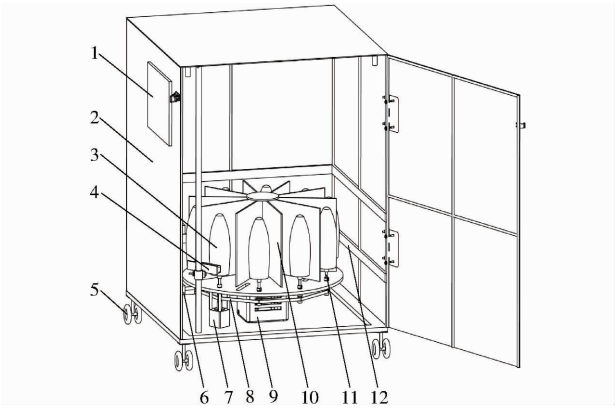


图 1　玉米果穗表型采集装置整体结构图

Fig. 1　Overall structural diagram of maize ear phenotyping acquisition device

1. 触摸显示屏　2. 箱体　3. 果穗　4. 相机　5. 自锁滑轮　6. 核心处理器　7. 步进电机　8. 同步带　9. 驱动模块　10. 隔板　11. 样本夹具　12. LED 灯带

（1）旋转展示部分：驱动模块驱动 42STH38 步进电机与同步带传动系统驱动样本夹具实现果穗的自转运动，57HS22 步进电机驱动亚克力转盘实现 10 工位果穗的公转运动；旋转展示部分实现果穗的自动展示和自动更换。

（2）封闭式机架：设计了密闭空间（长 950 mm，宽 950 mm，高 600 mm）排除外界干扰，采用环形 LED 灯补光；机架底部安装了自锁滑轮，便于装置移动和固定。

（3）视频采集与处理：将 Intel RealSense 深度相机（D455）安装在机架对角线上，距离果穗 235 mm 处采集视频流。通过 USB 3.0 接口传输视频流至 Jetson Orin NX CLB 核心处理器，提取视频流中关键图像信息进行果穗全景图像拼接，基于提取的图像

信息和全景图像进行果穗穗长和穗粗的测量以及穗行数和穗粒数的统计。

1.2 工作流程

采集装置工作流程如图 2 所示,主要步骤为:

(1)果穗固定与预处理:将玉米果穗沿棒芯通过锥形夹具固定于旋转装置基座,封闭箱体排除干扰,打开 LED 光源进行均匀补光。

(2)硬件初始化:在触摸显示屏上启动核心处理器及系统界面,通过 UART 协议向 Arduino IDE 开发板发送采集指令。

(3)运动控制与信号触发:Arduino 开发板驱动步进电机执行复合旋转运动,当微动开关检测到预设初始相位时,向核心处理器通过串口发送电平触发信号。

(4)数据采集与传输:核心处理器调用 OpenCV 库实时捕获相机视频流,经 USB 3.0 接口存储至固态硬盘,单次采集时长由旋转周期自动校准。

(5)终止判定与数据处理:当微动开关再次检测到相位信号时,系统终止当前采集任务并反馈信号至核心处理器,系统调用玉米果穗全景图像拼接模块以及穗长、穗粗、穗行数、穗粒数识别计算模块。

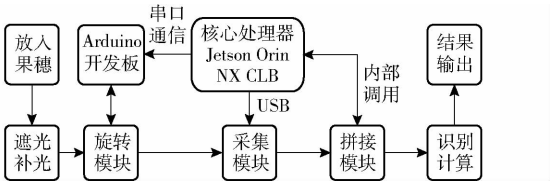


图 2 玉米果穗表型采集装置工作流程图

Fig. 2 Working flowchart of maize ear phenotyping acquisition device

2 关键单元设计

2.1 果穗采集状态设计

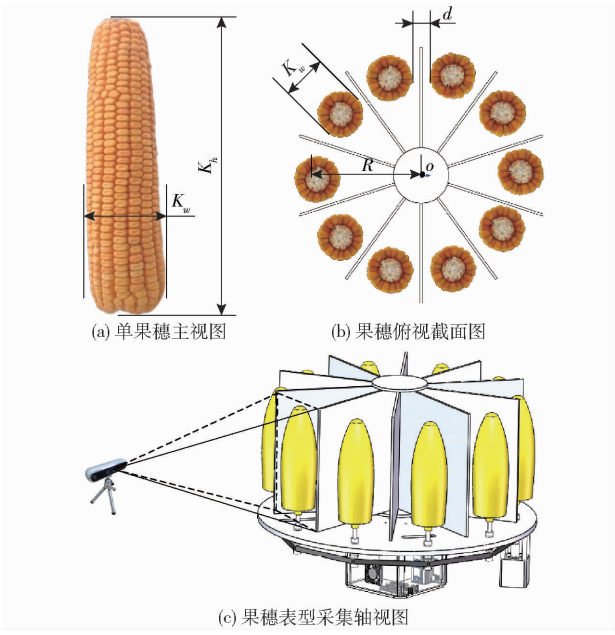
以云南地区主要栽种的玉米品种(云瑞 668、红单 6 号等)为研究对象,表 1 为各品种的平均穗长和平均穗粗,取最大值作为采集装置设计的主要依据[14]。

表 1 玉米品种参数

Tab. 1 Parameters of corn varieties mm

品种	穗长	穗粗
云瑞 668	200	50
红单 6 号	180	53
红谷 824	178	54
宣瑞 14 号	200	51
罗单 297	200	50
大好 969	270	56

图 3a 中 K_h 和 K_w 为穗长和穗粗,根据表 1 中穗长最大值 270 mm、穗粗最大值 56 mm,K_h 取 300 mm、K_w 取 60 mm 作为采集装置的设计参数。将 10 株玉米果穗竖直状态如图 3b 所示环形摆放,为保证每个玉米图像的独立性,玉米之间用隔板分离。果穗处于相机视场角覆盖范围内,防止相互遮挡,果穗之间留出间隔距离 d,取 $d = K_w$。根据多边形外接圆半径求解公式推导得



(a) 单果穗主视图 (b) 果穗俯视截面图

(c) 果穗表型采集轴视图

图 3 果穗姿态图

Fig. 3 Ear orientation diagrams

$$R \geqslant \frac{K_w + d}{2\sin\frac{\pi}{n}} + \frac{K_w}{2} \tag{1}$$

式中 R——果穗轴心到旋转中心的距离,mm

n——果穗数量,株

将 $n = 10$ 代入公式(1)计算得:$R \geqslant 374.7$ mm,圆整 R,取 $R = 400$ mm 作为装置的设计参数。

玉米果穗的棒芯由薄壁组织构成[15],其内部组织较棒芯硬度低,通过固定锥销穿刺薄壁组织内部将果穗如图 3c 所示进行竖直固定。

2.2 果穗采集距离与旋转速度确定

2.2.1 采集距离优化

合理设计玉米果穗的采集距离,确保获取清晰的图像,使装置占用空间合理。本着减少人力投入、提高数据采集效率和数据准确性的原则,根据果穗的穗长、穗粗、传感器参数确定采集距离。根据 Intel RealSense D455 相机固定参数(RGB 传感器宽 $l_w = 6.4$ mm,高 $l_h = 4.8$ mm,水平焦距 $f_w = 3.2$ mm,垂直焦距 $f_h = 3.7$ mm,水平视场角 $\theta_w = 90°$,垂直视场角 $\theta_h = 65°$)和果穗参数(穗长 $K_h = 300$ mm、穗粗 $K_w = 60$ mm)计算采集距离,相机水平视场范围 S_w 和垂直视场范围 S_h 如图 4 所示。

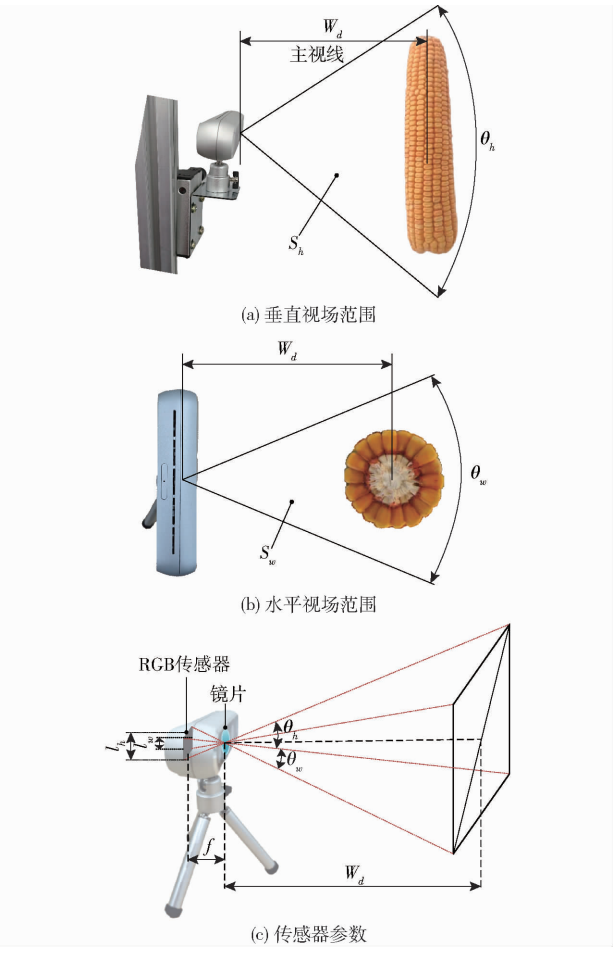


图 4　相机视场范围示意图

Fig. 4　Schematics of camera field of view range

因果穗穗长与穗粗尺寸不一致、相机视场角不同，需分别计算满足视场范围完整覆盖果穗轮廓的采集距离。将果穗穗长 K_h、相机垂直焦距 f_h、RGB 传感器的高 l_h 代入公式

$$\begin{cases} W_{d,h} = \dfrac{K_h f_h}{l_h} \\ W_{d,w} = \dfrac{K_w f_w}{l_w} \end{cases} \tag{2}$$

计算得到穗长约束下的采集距离 $W_{d,h} = 231.25$ mm。此时通过公式

$$\begin{cases} S_h = 2W_{d,h}\tan(\theta_h/2) \geqslant K_h \\ S_w = 2W_{d,w}\tan(\theta_w/2) \geqslant K_w \end{cases} \tag{3}$$

计算得垂直视场范围 S_h 为 300 mm，满足穗长尺寸要求（$S_h \geqslant K_h$）；将果穗穗粗 K_w、相机垂直焦距 f_w、RGB 传感器的宽 l_w 代入公式（2）计算得到穗粗约束下的采集距离 $W_{d,w} = 30$ mm，此时通过公式（3）计算得水平视场范围 S_w 为 300 mm，满足穗粗尺寸要求（$S_w \geqslant K_w$）。为确保果穗轮廓完整成像和满足数据圆整性要求，选择垂直方向作为设计限制因素，确定最小采集距离 W_d 为 235 mm，均有效覆盖玉米果穗，实现全景图像无盲区采集。

采用特征完整性指标（FCI）评估图像中形态和纹理的保留程度。通过量化测试图像与参考图像的特征匹配度（取值范围 0 ~ 1）来评定，FCI 值越大表明形态和纹理保留程度越高。基于上述计算的最小采集距离 $W_d = 235$ mm 进行合理性验证，设计对比试验为：为消除运动模糊干扰采用较慢转速（10 r/min），并依据预试验结果（当相机与果穗轴心距离小于 235 mm 时图像存在边界截断现象），设置 5 组梯度采集距离（235、300、350、400、450 mm）。每组距离下选取 3 株果穗样本（$n = 3$）进行图像采集，原始数据以无损 PNG 格式存储。计算各距离组 FCI 均值，构建其与采集距离的量化关系模型，并通过趋势分析验证最优参数，折线图如图 5 所示。

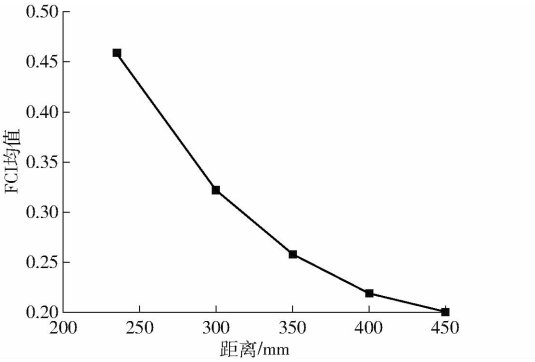


图 5　不同采集距离的图像 FCI 均值

Fig. 5　FCI values of images captured at different acquisition distances

试验结果表明，若以距离 235 mm 采集的图像作为计算 FCI 值的参考，235 ~ 400 mm 期间随着距离的增加，FCI 值呈递减趋势，由此确定 235 mm 为较优采集距离，能够保证特征完整性与图像质量。

2.2.2　旋转模块转速设计

玉米果穗最大自转转速 n_{max} 的影响因素是相机性能（最大帧率、曝光时间等）和果穗穗粗，计算公式为

$$n_{max} = \frac{60F}{M} \tag{4}$$

式中　F——帧率

M——每圈所需帧率

D455 相机的 RGB 传感器支持最大帧率为 30 f/s，需要每 4°采集一帧（90 f/r），计算出果穗自转最大转速为 20 r/min。

为了验证转速的合理性，开展了 235 mm 采集距离下不同转速试验，通过计算图像的 FCI 值来判断图像质量。试验旋转转速分别为：5、10、15、20、25 r/min。每个转速采集 3 株果穗样本（$n = 3$），图像以 PNG 格式存储。绘制不同采集转速对应图像的 FCI 值均值关系折线图，如图 6 所示，以静态采集

的图像作为参考对象,随着转速增加,图像 FCI 值呈递减趋势。为兼顾采集效率与图像质量,选择最大转速 20 r/min。

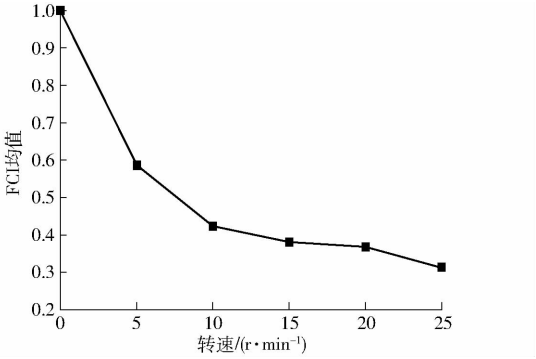


图 6 不同采集转速的图像 FCI 均值

Fig. 6 FCI values of images captured at different rotation speeds

2.3 控制系统设计

系统通过图形用户界面(GUI)与分布式控制架构实现玉米果穗表型自动化采集。核心处理器集成 GUI 交互模块,通过串口协议与 Arduino 开发板建立实时通信,THB6128 驱动板接收脉冲方向信号以驱动步进电机协同运动实现数据的采集。系统的控制架构设计包括决策层、执行层、传感层 3 级:①决策层搭载 NVIDIA Jetson Orin NX CLB 开发板(算力 100TOPS)、Ubuntu 20.04 LTS 操作系统与 ROS2 Humble 中间件,负责任务调度、图像处理算法执行及人机交互指令解析。②执行层配置双 THB6128 高细分驱动板,实现步进电机同步控制,结合 Arduino UNO R3 实现脉冲信号精确分发与旋转角度控制。③传感层采用 SS-5GL 微动限位行程开关(响应时间小于等于 1 ms)实现旋转模块定位反馈,通过自复位机制确保接触式检测的重复精度与可靠性。选用电机的关键参数如表 2 所示。

表 2 步进电机参数

Tab. 2 Parameters of stepper motor

通道	步进电机型号	微步分辨率	最大脉冲频率/kHz
公转	57HS22	1/16	50
自转	42STH38	1/32	100

算法核心逻辑基于 AccelStepper 库构建非阻塞控制架构,其算法流程如图 7 所示。系统上电后,首先执行硬件初始化程序:通过 Jetson Orin NX 加载设备驱动并建立 ROS2 节点通信;公转步进电机驱动转盘触发 SS-5GL 微动限位开关,采用二分法搜索策略进行零点标定,并将反馈信号发送至 Arduino 开发板以完成原点校准。校准完成后,系统立即切断驱动板使能信号并进入公转分度控制阶段:57HS22 步进电机(16 细分)以 36°为分度角执行间歇旋转,单步周期 T_{step} = 1.2 s(含 0.5 s 稳定延时),角定位精度小于等于 0.05°。当公转分度到达目标工位时,自转驱动板发送使能信号驱动 42STH38 步进电机以 20 r/min 匀速旋转,同时向 Jetson Orin NX 核心处理器发送触发信号;待果穗稳定旋转 0.5 s 后,系统启动视频流采集。完成 10 株果穗采集后,SS-5GL 微动限位开关再次反馈信号,系统终止采集流程并停止公转与自转电机运行。

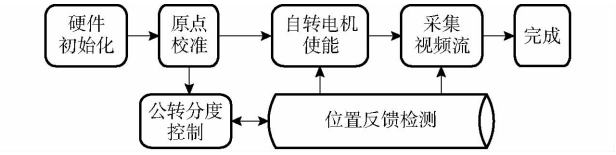


图 7 控制流程图

Fig. 7 Control flow diagram

3 果穗表型参数采集

对采集的视频流预处理,提取关键视频帧和去除重复帧,针对同一画面出现多株果穗混乱现象采用定位算法获取目标果穗,将果穗不规则画面展开为规则曲面,采用基于模板匹配的图像拼接算法拼接果穗的全景图像[16]。基于果穗全景图像统计穗行数和穗粒数,基于果穗侧面图像测量穗长和穗粗,实现果穗表型参数的自动识别和统计[17-19]。

3.1 果穗穗行数统计

果穗穗行数统计的算法流程如图 8 所示。其核心算法可分为图像预处理→特征增强→形态学优化→定量分析 4 个阶段。输入的果穗全景图像如图 9a 所示,采用 3×3 中值滤波器消除脉冲噪声,抑制籽粒间隙反光等高频干扰;基于垂直投影分析,动态截取纵向中心区域($y \in \left[\frac{H}{2}-10, \frac{H}{2}+10\right]$,$y$ 为图像坐标,H 为图像高度),该区域包含最密集的穗行分布特征,如图 9b 所示,可规避顶部未成熟籽粒与底部穗柄干扰;采用改进 Otsu 算法进行阈值分割,在传统类间方差最大化准则基础上,引入灰度梯度约束项以提升对比度区域的鲁棒性;采用 1×15 垂直结构元素执行闭运算,连接断裂穗行并填补小于等于 1 像素的间隙,保持穗行纵向连续性,使用 8×8 方形核对二值图像进行腐蚀操作,消除籽粒表面纹理产生的细小噪声,同时保留主穗行结构,进行连通域分析,如图 9c 所示;标记不同的区域,给每个标签上色,绘制矩形和中心点,如图 9d 所示,统计有效穗行,结合玉米生物学特性(穗行成对排列)进行

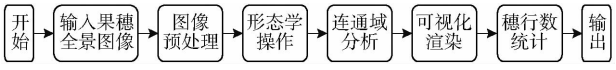
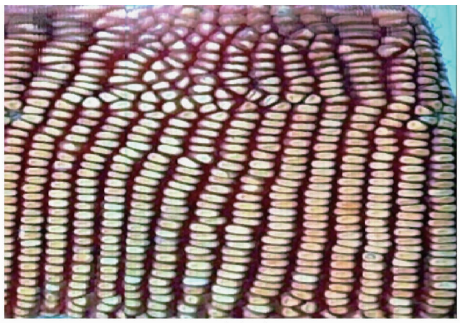


图 8 穗行数统计流程图

Fig. 8 Flowchart of ear row counting


(a) 果穗全景图


(b) 果穗截取区域图


(c) 形态学操作


(d) 可视化渲染

图 9　果穗穗行数处理过程图

Fig. 9　Processing steps for ear row counting

奇偶校验，剔除异常值[6,20]。

3.2　果穗穗长和穗粗测量

果穗单侧面图像与采集相机位置如图 3 所示，固定采集相机姿态和相机到果穗的距离，在果穗相同距离处放置卡尺，在图像中计算像素值与实际尺寸的比例关系，以测量果穗的实际穗长和穗粗。

YOLO v8 模型是一种实时目标检测算法，具有速度快、精度高的特点。采用 FasterNet 架构替换 YOLO v8 原有的骨干网络，引入自适应核卷积（Adaptive kernel convolution，AKConv）替代标准卷积层，消融实验结果如表 3 所示，模型性能得到优化。替换主干网络为 FasterNet 时，推理速度和精度有所下降，但计算量增加。当同时采用 FasterNet 和 AKConv 时，模型在保持高效推理的同时，提升了检测精度，且计算量适中，能够有效平衡模型的精度与效率。

表 3　消融实验结果

Tab. 3　Ablation experiment results

FasterNet	AKConv	精确率/%	召回率/%	mAP50/%	推理速度/(f·s^{-1})	浮点运算数
×	×	96.6	97.8	96.5	197.9	8.20×10^{9}
√	×	96.3	97.5	96.0	149.1	3.70×10^{10}
√	√	99.2	98.7	98.4	225.9	2.75×10^{10}

注：√表示采用该模块，×表示未采用该模块。

对改进后的 YOLO v8 模型进行预训练得到模型权重文件，结合自定义的果穗数据集进行微调训练，提高对果穗的检测精度；对果穗单侧面图像进行增强处理，调用 YOLO v8 模型识别果穗，如图 10 所示，获取果穗目标框的坐标（x、y、w、h），其中 x 和 y 是目标框中心点的坐标，w 和 h 分别是目标框的宽度和高度；根据目标框的高度 h 和比例关系，计算果穗的实际穗长；根据目标框的宽度 w 和比例关系计算果穗的穗粗。



图 10　YOLO v8 识别果穗目标

Fig. 10　YOLO v8-based ear target recognition

3.3　果穗穗粒数统计

果穗穗粒数的统计算法流程如图 11 所示。其核心算法可分为图像预处理→形态学优化→分水岭预处理→检测并分割粘连区域等阶段。对输入图像进行标准化预处理，包括尺寸归一化至 640 像素 × 640 像素、中值滤波去噪、灰度转换、高斯模糊平滑处理，以及自适应阈值二值化等；通过形态学闭运算优化二值图像，消除细小孔洞并平滑颗粒边界；为准备分水岭分割，计算二值图像的距离变换，提取前 10% 最大距离区域作为确定前景，通过连通组件分析建立初始标记；应用分水岭算法后[21]，针对可能存在的粘连颗粒，采用凸包缺陷分析方法，筛选深度超过阈值的有效凹点作为分割依据；最后，统计处理后的连通区域数量实现穗粒数统计。

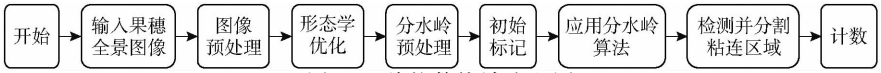


图 11　穗粒数统计流程图

Fig. 11　Flowchart of spikelet counting process

4　试验

试验为人工采集数据和装置采集（如图 12 所示），以验证玉米果穗表型采集装置的工作效率和测量精度。

通过人工连续上下料，即上一批（10 株）完成采集后立即将下一批（10 株）果穗放入装置中，记录连


(a) 装置采集数据　　(b) 人工采集数据

图 12　玉米果穗表型采集装置样机

Fig. 12　Prototype of maize ear phenotype acquisition device

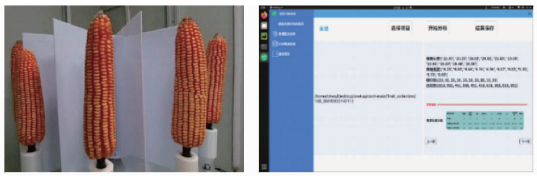
续采集到输出表型参数所耗费的总时间。随机选取30、50、70 株玉米果穗开展 3 组试验,按照上述方法计算本装置连续运行时的果穗表型采集效率,结果如表 4 所示。

表 4 装置采集效率

Tab. 4 Device acquisition efficiency

序号	样本数/株	总耗时/s	单穗全过程耗时/s
1	30	1 144	38. 13
2	50	1 915	38. 30
3	70	2 661	38. 01

装置采集果穗过程图及果穗表型参数识别输出结果如图 13 所示,通过随机选取多个果穗样本测量统计后得出,装置对单个玉米果穗进行考种的平均耗时为 38. 15 s。



(a) 采集果穗过程图 (b) 果穗表型参数识别输出图

图 13 果穗图像及处理结果

Fig. 13 Ear images and processing results

从表 5 得出果穗表型参数的测量精度:穗长测量精度 98. 89%,穗粗测量精度 97. 10%,穗行数统计精度 97. 31%,穗粒数统计精度 96. 19%,表明基于果穗自转与单相机观测的表型采集装置具有较高的准确性。

表 5 试验测试结果

Tab. 5 Experimental test results

样本	果穗穗长测量值			果穗穗粗测量值			穗行数计算值			总粒数计算值		
序号	系统/mm	人工/mm	误差/%	系统/mm	人工/mm	误差/%	系统/行	人工/行	误差/%	系统/粒	人工/粒	误差/%
1	223. 7	224. 0	0. 13	41. 3	43. 0	3. 95	20	20	0	813	830	2. 09
2	202. 5	218. 0	7. 11	40. 3	43. 1	6. 50	16	14	14. 29	591	636	7. 61
3	180. 2	187. 0	3. 64	46. 4	47. 5	2. 32	20	20	0	461	511	10. 85
4	240. 2	248. 0	3. 15	47. 4	47. 6	0. 42	18	18	0	586	658	12. 29
5	236. 9	226. 0	4. 82	45. 6	46. 9	2. 77	16	16	0	451	422	6. 43
6	193. 4	196. 0	1. 33	41. 7	41. 1	1. 46	18	18	0	418	534	27. 75
7	205. 8	215. 0	4. 28	40. 2	41. 7	3. 60	18	18	0	626	604	3. 51
8	198. 3	202. 0	1. 83	43. 6	47. 3	7. 82	18	18	0	565	599	6. 02
9	204. 6	205. 0	0. 20	37. 3	38. 5	3. 12	18	16	12. 50	519	611	17. 73
10	200. 8	201. 0	0. 10	38. 5	41. 0	6. 10	20	20	0	652	689	5. 67
11	188. 7	211. 0	10. 57	45. 4	45. 7	0. 66	22	20	10. 00	612	604	1. 31
12	242. 8	227. 0	6. 96	37. 6	40. 3	6. 70	16	16	0	594	677	13. 97
13	182. 3	185. 0	1. 46	46. 2	46. 4	0. 43	22	20	10. 00	658	623	5. 32
14	255. 3	254. 0	0. 51	38. 7	40. 8	5. 15	22	22	0	840	870	3. 57
15	198. 0	199. 0	0. 50	52. 4	54. 9	4. 55	20	18	11. 11	564	575	1. 95
16	204. 3	201. 0	1. 64	49. 6	51. 3	3. 31	26	26	0	709	746	5. 22
17	186. 1	187. 0	0. 48	44. 1	44. 7	1. 34	12	12	0	551	445	19. 24
18	197. 0	199. 0	1. 01	43. 9	44. 5	1. 35	18	18	0	687	754	9. 75
19	236. 0	242. 0	2. 48	44. 2	45. 2	2. 21	16	16	0	605	623	2. 98
20	211. 2	208. 0	1. 54	40. 8	39. 5	3. 29	16	16	0	530	498	6. 04
总计	4 188. 1	4 235		865. 2	891		372	362		12 032	12 509	

5 结论

(1)通过同步控制旋转平台与机器视觉系统,结合动态视频流关键帧提取及全景图像拼接算法,实现了穗长、穗粗、穗行数和穗粒数的自动测量与统计。

(2)试验结果表明:装置单穗平均处理时间为 38. 15 s;关键参数采集方面取得良好性能,穗长测量精度为 98. 89%,穗粗测量精度为 97. 10%,穗行数统计精度为 97. 31%,穗粒数统计精度为 96. 19%。

(3)单相机多视角融合方案相较传统多相机系统,显著降低硬件成本。该研究成果可为大规模作物表型组学研究提供可靠的技术和装备支撑。

参 考 文 献

[1] 贾彪,贺正,王锐,等. 基于归一化冠层覆盖系数的玉米果穗发育动态估算[J]. 农业机械学报,2020,51(3):138 - 145.
JIA Biao, HE Zheng, WANG Rui, et al. Estimation of ear development dynamics of maize based on normalized canopy cover

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):138 – 145. (in Chinese)
[2] 宋鹏,李正达,杨蒙,等. 作物表型机器人研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(3):1 – 17.
SONG Peng, LI Zhengda, YANG Meng, et al. Current status and prospects of crop phenotyping robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):1 – 17. (in Chinese)
[3] 张新伟,易克传,刘向东,等. 玉米自动化考种过程的粘连籽粒图像分割[J]. 中国农业大学学报,2018,23(10):144 – 151.
ZHANG Xinwei,YI Kechuan, LIU Xiangdong, et al. Image segmentation of adhesive corn seeds during automatic seed test[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(10):144 – 151. (in Chinese)
[4] CHUNHUI L,HONGHUI G, XIN J,et al. Genomic insights into historical improvement of heterotic groups during modern hybrid maize breeding[J]. Nature Plants,2022,8(7):750 – 763.
[5] 宋鹏,张晗,王成,等. 玉米高通量自动考种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(16):41 – 47.
SONG Peng, ZHANG Han, WANG Cheng, et al. Design and experiment of high throughput automatic measuring device for corn [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 41 – 47. (in Chinese)
[6] 吴刚,吴云帆,陈度,等. 基于机器视觉的玉米果穗性状参数测量方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):357 – 365.
WU Gang, WU Yunfan, CHEN Du, et al. Measurement method of maize ear characters based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 2):357 – 365. (in Chinese)
[7] 赵燕东,刘浩宇,宋润泽,等. 多传感器作物表型时间同步采集方法[J]. 农业机械学报,2025,56(3):58 – 66.
ZHAO Yandong, LIU Haoyu, SONG Runze, et al. Multi-sensor crop phenotype time synchronous acquisition method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):58 – 66. (in Chinese)
[8] 徐胜勇,易同舟,秦子轶,等. 基于单视角 RGBD 图像的柑橘果实三维重建与表型检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(3):80 – 90.
XU Shengyong, YI Tongzhou, QIN Ziyi, et al. Three-dimensional reconstruction and phenotype detection of citrus fruits based on single-view RGBD images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 80 – 90. (in Chinese)
[9] 谢立敏,黄轶,吴昊宇,等. 基于 SwinPoinTr 的视角受限下杏鲍菇表型参数测量方法[J]. 农业机械学报,2025,56(3):148 – 157.
XIE Limin, HUANG Yi, WU Haoyu, et al. Phenotypic parameter measurement method for *Pleurotus eryngii* based on SwinPoinTr under limited view conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 148 – 157. (in Chinese)
[10] AMBROSE A,KANDPAL M L,KIM S M, et al. High speed measurement of corn seed viability using hyperspectral imaging [J]. Infrared Physics and Technology,2016,75:173 – 179.
[11] 伍玺. 高通量多光学表型结合 GWAS 解析玉米抗旱遗传基础[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
WU Xi. High-throughput multi-optical phenotyping combined with GWAS to dissect the genetic basis of drought resistance in maize[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[12] ZAREMEHRJERDI H, COFFEY L, JUBERY T, et al. MaizeEar-SAM: zero-shot maize ear phenotyping[J]. arXiv Preprint, arXiv:2502.13399, 2025.
[13] JIN X, DUAN Z, YANG G, et al. High-throughput estimation of crop traits: a review of ground and aerial phenotyping platforms[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021, 9(1): 200 – 231.
[14] 林丽萍. 云南省玉米制种产业发展现状及对策[J]. 云南农业,2018(1):42 – 44.
[15] 高朋飞,张新伟,姜春霞,等. 轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):145 – 156.
GAO Pengfei, ZHANG Xinwei, JIANG Chunxia, et al. Optimized design and test of axial roller fresh corn threshing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):145 – 156. (in Chinese)
[16] HUANGFU Y, CHEN H, HUANG Z, et al. Research on a panoramic image stitching method for images of corn ears, based on video streaming[J]. Agronomy, 2024, 14: 2884.
[17] 王传宇,郭新宇,吴升,等. 基于计算机视觉的玉米果穗三维重建方法[J]. 农业机械学报,2014,45(9):274 – 279,253.
WANG Chuanyu, GUO Xinyu, WU Sheng, et al. Three dimensional reconstruction of maize ear based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):274 – 279,253. (in Chinese)
[18] 柳冠伊,刘平义,魏文军,等. 玉米果穗粘连籽粒图像分割方法[J]. 农业机械学报,2014,45(9):285 – 290.
LIU Guanyi, LIU Pingyi, WEI Wenjun, et al. Method of image segmentation for touching maize kernels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):285 – 290. (in Chinese)
[19] 荀一,鲍官军,杨庆华,等. 粘连玉米籽粒图像的自动分割方法[J]. 农业机械学报,2010,41(4):163 – 167.
XUN Yi, BAO Guanjun, YANG Qinghua, et al. Automatic segmentation of touching corn kernels in digital image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(4):163 – 167. (in Chinese)
[20] 刘长青,陈兵旗. 基于机器视觉的玉米果穗参数的图像测量方法[J]. 农业工程学报,2014,30(6):131 – 138.
LIU Changqing, CHEN Bingqi. Method of image detection for ear of corn based on computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 131 – 138. (in Chinese)
[21] 赵德胜,高德东,苏伟鸿,等. 基于形状因子与改进分水岭分割的光伏检测算法[J]. 计算机应用,2024,44(增刊):343 – 348.
ZHAO Desheng, GAO Dedong, SU Weihong, et al. Photovoltaic detection algorithm based on shape factor and improved watershed segmentation[J]. Journal of Computer Applications,2024,44(Supp.):343 – 348. (in Chinese)