

油菜角果数量及关键表型参数的自动化检测方法研究

刘仁峰¹, 黄诗瑶², 聂勇鹏², 徐胜勇^{2*}

(1. 武汉轻工大学数计学院, 湖北 武汉, 430023; 2. 华中农业大学工学院, 湖北 武汉, 430070)

摘要:为有效替代人工方式考种油菜、观测角果, 研究了一种用于测量批量角果的数量和关键表型参数的自动化检测方法。设计了角果散铺和图像采集装置, 利用拨动加振动的方式将堆积角果均匀散开并拍摄视频; 使用二维码作为标记块, 以有效地提取关键帧并拼接为包含全部角果的整幅图像; 提出了基于凹点提取与匹配的图像分割方法, 分割各种形态下的重叠角果, 准确率达到98%以上。在关键表型参数测量中, 利用了最大类间方差法以判断角果的正置或侧置姿态, 以此估计角果横切面的近似椭圆长短轴, 再计算角果的长度、表面积和体积。实验结果表明该方法具有很好的检测精度, 对不同品种的油菜适应性较好, 长度、表面积和体积的估计误差分别不大于2.9%、4.8%和5.0%。该方法可以有效替代人工方式的油菜考种, 为相关农业科研领域提供基础数据。

关键词:油菜角果; 数量检测; 表型参数; 图像处理

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2020)01-0071-07



OSID

Automated detection research for number and key phenotypic parameters of rapeseed silique

LIU Ren-feng¹, HUANG Shi-yao², NIE Yong-peng², XU Sheng-yong^{2*}

(1. School of Mathematics & Computer Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Silique observation and measurement are essential for rapeseed breeding. In this paper, an automatic detection method was proposed to replace the traditional manual method. A device was designed to acquire video of scattered siliques, based on pulling and vibrating stacked siliques. Silique videos were extracted to frames, and then, by using QR code as marker blocks in image, the key frames containing all siliques were effectively extracted and spliced into individual intact. Crossed siliques in frame caused an error in measurement. A cutting method of crossed siliques image based on concave point extraction and matching was proposed. By this method, all kinds of crossed siliques could be identified with accuracy rate of 98.0%. In the measurement of phenotypic parameters, a core diameter Otsu method was proposed to judge the posture of silique, by which elliptic long and short axis of the cross section of the silique was estimated, and then length, surface area and volume of the silique were calculated. Results demonstrated good accuracy and adaptability to different varieties of rape by this method. Estimation error of length, surface area and volume were less than 2.9%, 4.8% and 5.0% respectively. Thus the method could be an effective replacement of artificial way and provide key basic data for rapeseed and agricultural research fields.

Key words: rapeseed silique; quantity detection; phenotypic parameter; image processing

决定油菜产量形成的关键因子主要有单株角果数、每角粒数和千粒重^[1]。角果长度是产量的重要决定因素和育种目标性状, 其遗传基础对油菜产量提升具有重要意义^[2,3]。油菜角果的观测对研究油菜产量及其构成因子具有重要价值, 也是栽培与

育种中定量界定和遗传研究的基础, 同时还为油菜清洗和筛选机械的改进和优化设计提供理论依据^[4,5]。

利用视觉系统无损测量油菜角果表型参数是一种可行而高效的方法。岳延滨等在利用试验数

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1000904); 湖北省教育厅科学研究计划(B2018083)

作者简介: 刘仁峰(1980-), 男, 江西永新人, 讲师, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: 9231670@qq.com

* 通讯作者: 徐胜勇(1980-), 男, 湖北蕲春人, 副教授, 博士, 主要研究方向为农业机器人, E-mail: xsy@mail.hzau.edu.cn

据建立角果生长函数的基础上,构建基于角果形态特征参数的几何模型,为构建可视化油菜生长系统奠定了技术基础^[6]。汪文祥等以数字图像处理技术为基础,建立了一套油菜株型角度测量方法,可为油菜分枝角度和着生角的遗传研究提供技术支撑^[7]。Yang等分别以苗期阶段和荚果阶段作为研究材料选择了油菜植物的3D点云数据,提出一种基于法向矢量的三维点云分割方法,使用3D激光扫描仪来获得角果期油菜植株的3D点云数据,为后续表型参数无损测量奠定了基础^[8]。徐胜勇等提出一种基于RGB-D相机的油菜分枝三维重建和角果识别定位方法,可以精确检测分枝角果的数量,但该方法对于高密度角果的植株检测精度不高,且不能测量角果表型参数^[9]。目前角果的数量和表型参数主要依靠人工测量,费时费力,测量的精度和规模都受限。总体而言,缺乏对批量的角果进行观测的自动化方法。因此,本文研究了一种自动化装置,通过对堆积角果的散铺处理和图像采集与分析,可以精确地、智能地测量批量角果的数量和农艺性状参数。

1 材料与方 法

1.1 材料

2018年5月和8月分别在华中农业大学的校内试验田、四川试验基地,采集了中双6号、大地55、华油杂62号、丹本、沔油520等5个品种的甘蓝型油菜植株,人工剪下角果装袋。使用了自主设计的图像采集装置,彩色CCD型号为500万像素的SunWay U3D500C-J。本文算法开发和测试的平台为通用计算机(i5 4200M 2.5 GHz、8GB DDR3内存、250GB三

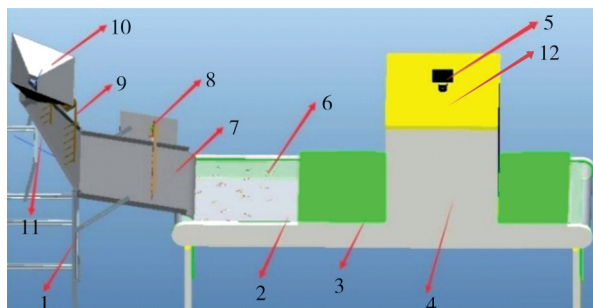
星固态硬盘、NVIDIA GeForce GT 755M显卡)、Windows 10专业版和MATLAB R2017b。

1.2 角果散铺与视频采集装置

1.2.1 整体设计 堆积的角果难以进行图像处理和分析,因此设计了一种装置将角果尽量分散开,再拍摄散铺的角果的图像。该装置总体尺寸(长宽高)为3 m×0.6 m×1.3 m。使用ProE建立的三维结构模型如图1所示,包括12个部分:1—机座,2—传送带,3—遮光板,4—暗箱(长×宽×高约为0.5 m×0.5 m×0.5 m),5—CCD相机,6—角果,7—上/下斜面板,8、9—下、上横向拨杆,10—料斗,11—振动电机,12—LED平面灯板。

传动带是透明塑料材质,由LED平板灯制造背光效果。暗箱防止了外界光照干扰,CCD安装在暗箱的正上方,垂直向下。上、下斜面板之间用铰链连接,连接角度可调。在横向拨杆上等距固定有垂直于斜面板的细杆,步进电机带动一个曲柄滑块机构驱动拨杆横向往复运动。流水线和2根横向拨杆各使用了1个42BYGH34-401A步进电机带动,每个电机接TB6560驱动板的一路输出。TB6560驱动板连接到STM32控制电路的I/O输入端,改变电平即可对电机进行正、反转和停止的操作。AF130直流振动马达连接PWM直流电机驱动器产生振动效果,可以手动调节震动频率以达到最佳的分散效果。所有电气元件和电路由200W航加双数显直流开关电源供电。

1.2.2 工作原理 背光光源的成像效果和图像处理结果最优,因此采用了背光光源照射的透明材质传送带组建图像采集装置。人工上料后启动装置,堆积的角果在重力和振动的共同作用下滑入斜面



注:A图展示了装置的12个部分:1—机座,2—传送带,3—遮光板,4—暗箱(长×宽×高约为0.5 m×0.5 m×0.5 m),5—CCD相机,6—角果,7—上/下斜面板,8、9—下、上横向拨杆,10—料斗,11—振动电机,12—LED平面灯板;B图为装置实物图片

Note: 12 parts are shown in A: 1—pedestal; 2—conveyor; 3—visor; 4—darkroom (length × width × height about 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m); 5—CCD camera; 6—silique; 7—up / down skew panel; 8, 9—down and up horizontal paddle; 10—hopper; 11—vibration motor; 12 LED lamp panel. B is the photograph of the whole device

图1 角果散铺与视频采集装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram and photograph of the device for silique-spreading and video capture

板,此时横向拨杆在步进电机的驱动下横向来回拨动角果,角果在下滑过程中被均匀地拨散。分散的角果从下斜面板跌落到运转中的传送带上,保持着分散状态进入暗箱,系统软件控制 CCD 拍摄散铺角果的视频,再进行后续的图像处理。

1.3 角果视频处理方法

1.3.1 关键帧抽取与帧拼接 一株油菜的角果通常超过 200 个,而图像采集装置拍摄的一幅图像中包含角果约为十几个。因此,一次测量中拍摄的角果视频将解压出大量的单帧图像。为了不重复也不遗漏角果,同时减少图片处理数量提高检测速度,需要抽取关键帧并进行拼接以得到一幅包含全部角果的图像。在关键帧的抽取与拼接中,使用二维码作为标记块,将显著提高拼接速度和成功率。二维码采用海明码编码,被设计为方形的黑白图案,等距地粘贴于传送带的边缘。间距依据相机的视场范围确定,保证每一帧中不超过 2 个也不少于 1 个二维码。(1) 关键帧抽取。依据二维码的粘贴位置可以从帧中划分出一个只包含二维码的矩形子区域。将该子区域转换为灰度图像,再使用自适应阈值分割算法对图像进行二值化并检测其中的轮廓,最后使用四点的矩形拟合待选轮廓,继而解码。按解压顺序识别帧中的标识块数量和标识码,标识块数量为 2 且标识码不同的相邻两帧即为关键帧。(2) 关键帧拼接。对于待拼接的两幅图像分别计算两幅图像中同一个二维码的中心点坐标,依据坐标的差值将后一帧图像平移并叠加在前一帧图像,完成一次图像拼接。顺序处理所有关键帧,得到包含所有角果的一幅图像。

1.3.2 图像预处理和尺寸标定 角果的背光图像中有大量的噪声,需要滤除。如图 2 所示为图像预处理的过程和中间结果。首先采用大小为 3×3 的结构算子对图像进行中值滤波处理,平滑噪点,再对

图像进行 OTSU 阈值分割。角果的外形参数不计角果的柄和喙,根据柄和喙的尺寸远小于角果的特点,采用半径为 3 的圆形结构算子对图像进行形态学“开”操作,再剔除小于设定的连通域面积阈值,可以消除柄和喙,最终得到只包含角果本体的二值图像。此外,使用钢尺进行像素-物理尺度标定。标定图像中,最大的连通域即为钢尺。计算该连通域的最小外接矩形并计算矩形的长度,结合钢尺的实际长度,可以确定标定参数。

1.4 基于凹点检测的重叠角果图像分割算法

1.4.1 基于凹点的重叠角果分割原理与凹点检测方法 散铺处理后的角果仍然存在较多的重叠,将重叠角果图像分割为单个角果是表型参数测量的关键前提。单个角果的边缘近似于平滑的曲线,当几个角果重叠时,其边缘会形成“凹点”^[10]。可以基于凹点的数量和相互距离推断角果图像中是否存在重叠。凹点检测的流程为:

(1) 检测二值角果图像中的连通域,按连通域划分成多幅子图像。

(2) 使用 CANNY 算子检测子图像的边缘,定义子图像边缘上的每个点都有与之对应的内凹程度 T 和相交程度 Sum 。

(3) 当某点内凹程度和相交程度均大于给定阈值时,该点视为凹点。

1.4.2 基于凹点数量的重叠角果判定和分割 两个角果重叠的部分称作重叠区域,该重叠区域可能包含 0 到 n 个凹点。两个角果交叉重叠是最为常见的重叠方式,此时凹点数量为 4,且凹点的相互距离很近。凹点数量大于 4 的情况可以分解为凹点数量为 4 和其他情况的简单叠加。如图 3 所示为凹点数量为 4 时的分割示意图。如果任取两个凹点确定第一条分割线,余下的两个凹点将确定另一条分割线,一共有三种组合方式。其中,对角线上的两个



注:A:彩色的角果图像;B:中值滤波和 OTSU 阈值分割;C:删除小面积连通域

Note: A: a color image of siliques; B: median filtered and segmented by the OTSU algorithm; C: small connected domains were filtered

图 2 图像预处理的流程与结果

Fig. 2 Procedure and result of image preprocessing

凹点连接的分割线会将重叠角果区域分割为4个连通域,该种方式需要剔除。余下的两种分割方式,都可以将重叠角果分割为两个连通域。

依据散铺角果的可能姿态,凹点数量有如下几种可能性和对应的分割方法。

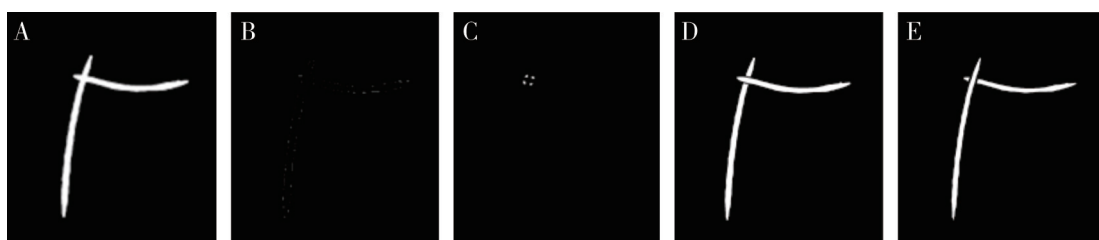
(1) $n=$ 奇数。角果存在内凹。处理方法:与其他凹点的相对距离最大的凹点被删除,凹点数量变为偶数,再进行其他判定。(2) $n=0$ 。①单个角果,不用分割。②两个角果首尾相连,形成一个大于设定的面积阈值。处理方法:从连通域的中点处划分为两个独立角果。③两个角果平行相邻,此时无法分割,产生误差。(3) $n=0$ 以外的偶数。① $n=2$ 时,有毛刺(面积很小的突起)的单个角果,或两个角果轻微重叠。处理方法:从两个凹点连线处将区域分割为两个部分,对于大于设定的面积阈值的部分判定为角果,否则判定为毛刺。② $n \geq 4$ 时,两个及以上的

角果交叉重叠,或存在毛刺的多个角果。处理方法:根据凹点的相互距离做聚类分析,凹点(2或4个)被分为同一类,先对4个凹点的类进行分割,对于大于设定的面积阈值的部分判定为角果,否则判定为毛刺,再对其他类的进行处理,直至未处理凹点数量为0。

重叠角果分割算法流程如图4A所示。图4B-D是三个分割实例。图4B是轻微重叠的两个角果, $n=2$;图4C是有毛刺的角果, $n=2$;图4D是三个重叠角果, $n=6$ 。全部凹点处理完毕,统计符合面积标准的连通域数量,即为角果的数量。

1.5 基于姿态估计的角果表型参数估算

1.5.1 角果姿态估计 角果摆放的姿态会严重影响基于机器视觉的表型参数估算精度。角果中间二分之一段的平均宽度称之为“核心直径”。角果的横截面近似为一个椭圆,同一个角果在正置和侧

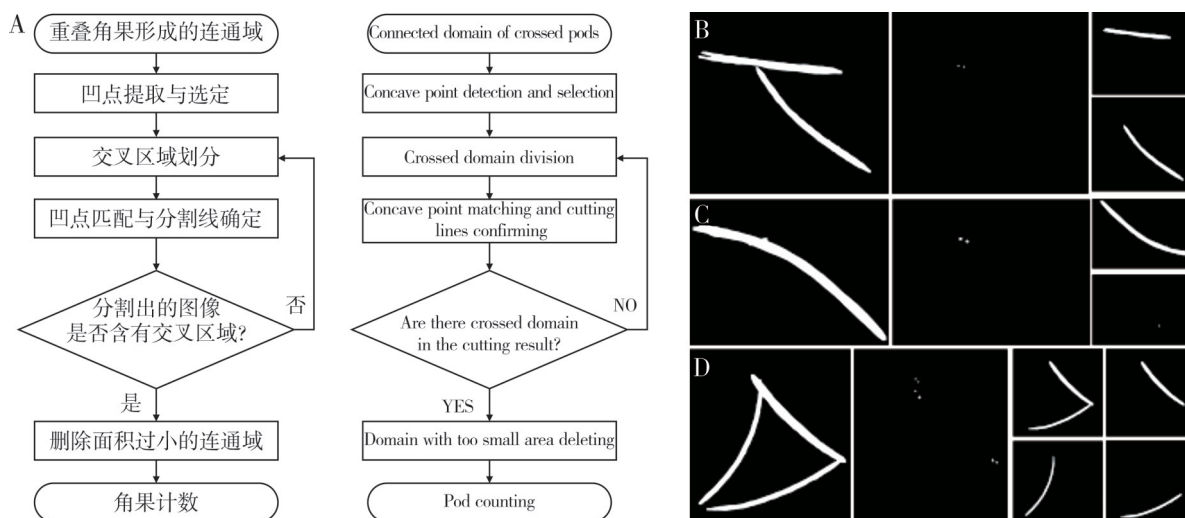


注:A:两个重叠角果图像;B:边缘检测;C:凹点检测;D:分割方式1;E:分割方式2

Note: A: image of two crossed siliques; B: edge detection; C: concave point detection; D: the first segmentation model of two crossed siliques; E: the second segmentation model of two crossed siliques

图3 两个角果重叠时的分割方法

Fig. 3 Two possible segmentation method for two overlapping siliques



注:A:重叠角果角果分割算法流程图;B:两个角果轻微重叠;C:有毛刺的角果;D:三个角果重叠

Note: A: algorithm flow chart of crossed siliques segmentation; B: two slight crossed siliques; C: a silique with curr; D: three crossed siliques

图4 重叠角果分割算法流程图和实例

Fig. 4 Algorithm flowchart for overlapping rapeseed segmentation and examples

置两种姿态下的核心直径存在显著区别。两种姿态下的核心直径分布方差为单峰,因此可以使用最大类间方差法^[11]计算最佳的核心直径划分阈值。对于核心直径大于该阈值的角果判定为正置姿态,反之判定为侧置。

1.5.2 表型参数估算 ①角果长度:单个角果图像先进行细化得到骨架,计算骨架的像素长度再换算为物理尺寸,可以得到角果的实际长度 L 。②角果表面积和体积:角果表面凹凸不平,但任意一处的横截面为近似的椭圆形。利用椭圆的几何公式可以估算角果的表面积和体积。已知角果的姿态,角果切片每一处的宽度为 ρ ,则该切片的拟合椭圆的长轴 a 和短轴 b 计算公式如式(1):

$$\begin{cases} \text{正置姿态: } a = \rho, \quad b = \frac{\rho}{\gamma} \\ \text{侧置姿态: } a = \rho\gamma, \quad b = \rho \end{cases} \quad (1)$$

其中, γ 为一幅待测图像中,正置和侧置的角果核心直径的平均值的比值,用于已知近似椭圆的一个轴估算另一个轴。对角果切片面积的进行积分估算其表面积 S ,如式(2):

$$S = \pi \times a \times b \times \sum L \quad (2)$$

对角果每一个切面的体积进行积分以估算其体积 V ,如式(3):

$$V = \sum (\pi \times a \times b) \quad (3)$$

2 结果与分析

在角果观测中,通常取样3棵油菜植株,将总体的测量结果作为该品种的表征值。因此,为量化评估本文所提出角果数量和表型参数检测方法的准确性和稳定性,随机选取5个品种油菜植株各13株进行实验,统计一个品种的多株油菜的测量平均值

或总和,并与人工测量方法的结果进行对比。

2.1 角果数量检测

角果数量识别结果如表1所示。由表1可以看出,本文提出的方法能取得较好的检测效果,各品种的整体识别率均超过98.0%。平均检测一株油菜的时间约为320s(不包括上料和图像采集的时间),与人工计数的速度接近,但该方式自动化程度高,人工操作简便、劳动量很小。本文方法识别的角果数比实际数量小,主要有2个因素:①并列相邻的角果被判定为1个角果;②两个小角果首尾相连被判定为1个角果。一般而言,如果降低角果的下料速度,角果重叠概率将降低,误检率将下降,但图像采集和图像处理的时间都会增加。

2.2 角果表型参数检测

测量了5个品种各1株油菜,角果总数量超过1200个。统计每一株油菜的角果数量和长度/表面积/体积的总和,同时给出了人工测量结果作为真实值。总长度(mm)、表面积(mm²)、体积(mm³)分别用 L 、 S 和 V 标识。人工测量角果表型方法:①用细绳沿角果的中轴线贴合,标记角果的两端,再测量标记的细绳段的长度,作为角果的实际长度;②用排水法一次性测多个角果的体积总和;③将角果剥皮,用亚克力板压平,再拍摄角果图像,运用机器视觉方法测量角果的表面积总和。本文中尺寸转换参数标定的结果为1.47 mm/pixel,使用该参数将图像处理的测量结果转换为物理尺寸单位。定义了测量相对误差 ERR 描述测量精度,如公式(4)。

$$ERR = \frac{S_T}{S_R} * 100\% \quad (4)$$

其中, S_T 是自动测量值, S_R 是真实值。 R 是在95%置信区间内的相关系数。实验结果如表2所示,表明

表1 角果数量检测实验结果
Table 1 Experiments results of silique quantity detection

油菜品种 Rapeseed material	每株平均耗时/s Duration /s	实际角果总数/个 Actural siliques	识别角果总数/个 Detected siliques	准确率/% Accuration rate
中双6号 Zhongshuang 6	312.6	2835	2779	98.0
大地55 Dadi 55	323.8	3189	3129	98.1
华油杂62号 Huayouza 62	306.1	2957	2912	98.4
丹本 Danben	331.8	3177	3130	98.5
沔油520 Fengyou 520	328.6	3046	3001	98.5

表2 角果表型参数检测实验结果

Table 2 Experiments results of silique phenotypic parameter detection

油菜品种 Rapeseed material	角果数 Silique number	表型参数 Phenotypic parameter	自动测量 S_T	人工测量 S_R	ERR	r
中双6号 Zhongshuang 6	222	L	15 110.6	15 147.2	99.7%	0.987
		S	52 330.4	53 674.6	97.5%	0.821
		V	12 003.4	11 845.8	101.3%	0.779
大地55 Dadi 55	244	L	18 231.5	18 468.2	98.7%	0.966
		S	59 221.0	59 982.4	98.7%	0.882
		V	15 010.4	14 321.3	104.8%	0.722
华油杂62号 Huayouza 62	213	L	14 221.2	14 342.2	99.1%	0.964
		S	46 334.7	47 675.6	97.1%	0.811
		V	11 013.4	10 724.8	102.6%	0.725
丹本 Danben	240	L	17 611.2	18 122.2	97.2%	0.961
		S	63 326.4	65 672.2	96.4%	0.802
		V	14 024.6	13 380.0	104.8%	0.716
沔油520 Fengyou 520	231	L	16 312.6	16 647.2	97.9%	0.944
		S	56 231.4	57 867.2	97.1%	0.801
		V	13 013.4	12 384.5	105.0%	0.711

注: L 、 S 和 V 分别表示总长度(mm)、表面积(mm²)、体积(mm³); S_T 是自动测量值, S_R 人工测量值; ERR 是自动测量相对误差; r 是在95%置信区间内的相关系数

Note: L is length(mm), S is surface area(mm²), V is volume(mm³); S_T : automatic measured value; S_R : manual measured value; ERR : relative error of automatic measurement; r : correlation coefficient in 95% confidence interval

了本文的表型检测方法具有很高的准确度和可信度。长度误差主要来自于去柄去喙算法,整体误差很小。表面积和体积的测量误差主要来自于两个部分:①错误的姿态估计,有些角果天生比较细小,正置和侧置时的核心直径非常接近,容易因为直径过小导致被算作侧置;②角果横截面并不是一个完美的椭圆,计算公式存在误差。5个品种的自动化测量方法精度较为接近,其中丹本和沔油520的测量精度相比其他三种的测量误差更大。观察分析,该两个品种的角果较为扁平,其横截面与标准椭圆差异更大,导致了更大的表型估计误差。

3 结论与讨论

本研究研制了一种角果数量和表型参数自动化的检测方法和装置,检测精确高、速度快、不损伤角果。本方法对角果散铺的要求较高,如果存在角果严重堆积的情况,检测精度会严重下降。此外,长时间使用会导致透明传送带沾染杂质,图像质量严重下降会导致检测精度的下降。总之,基于机器视觉的角果自动检测方法可以有效替代人工考种,具有一定的推广应用价值。但从长远看,基于三维重建的角果自动检测方法更具潜力,有希望实现大田角果的原位测量,为作物遗传育种、高产栽培等研究提供关键基础数据。

参考文献:

- [1] 李岚涛,任涛,汪善勤,等.基于角果期高光谱的冬油菜产量预测模型研究[J].农业机械学报,2017,48(3):221-229.
- [2] 税红霞,汤天泽,牛应泽.油菜内源激素与角果长度发育的关系[J].中国油料作物学报,2006,28(3):309-314.
- [3] 张云虹,张永吉,周如美,等.甘蓝型油菜与白芥杂种后代抗裂角性及其与角果性状的相关性[J].中国油料作物学报,2017,39(1):18-22.
- [4] Mingliang W, Lun T, Chunyun G, et al. Optimization analysis on parameters of cleaning sieve of rape combine of "Bi Lang 4LZ(Y)-1.0" [J]. Adv J Food Sci Technol, 2014, 6(1): 144-148.
- [5] 周庆红,周灿,郑伟,等.甘蓝型油菜角果长度全基因组关联分析[J].中国农业科学,2017,50(2):228-239.
- [6] 岳延滨,朱艳,曹宏鑫,等.基于几何参数模型和OpenGL的油菜角果可视化研究[J].江苏农业科学,2011(1):438-441.
- [7] 汪文祥,胡琼,梅德圣,等.基于图像处理的油菜分枝及角果着生角度测量方法[J].中国油料作物学报,2015,37(4):566-570+575.
- [8] Yang L, Zhai R F, Shi P J, et al. Segmentation of crop organs through region growing in 3D space[C]. 2016 5th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-

- geoinformatics). IEEE, 2016.
- [9] 徐胜勇, 卢昆, 潘礼礼, 等. 基于RGB-D相机的油菜分枝三维重构与角果识别定位方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 21-27.
- [10] 李毅念, 杜世伟, 姚敏, 等. 基于小麦群体图像的田间麦穗计数及产量预测方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 185-194.
- [11] Truong M T N, Kim S. Automatic image thresholding using Otsu's method and entropy weighting scheme for surface defect detection[J]. Soft Computing, 2017, 2: 1-7.
- (责任编辑:郭学兰)