



基于分水岭和统计矩的大豆籽粒形态参数测量方法

丁琦¹, 徐伟¹, 李蒙², 王秀成², 卢伟¹, 盖钧镒², 王玲¹, 邢光南²

(1. 南京农业大学 工学院/现代设施农业技术装备工程实验室, 江苏 南京 210031; 2. 南京农业大学 大豆研究所/国家大豆改良中心/农业部大豆生物学与遗传改良重点实验室(综合)/作物遗传与种质创新国家重点实验室/江苏现代作物生产协同创新中心, 江苏 南京 210095)

摘要:为促进大豆考种及育种工作的高效进行,本研究设计一种大豆籽粒计数和面积、周长、粒长、粒宽等形态参数的测量软件。使用高拍仪采集大豆籽粒和标定板彩色图像,基于“Otsu”阈值法去除图像背景,获得大豆籽粒二值图像,基于分水岭变换法分割二值图中的粘连大豆籽粒,获取了一系列单粒、多粒大豆连通域,对极少数多粒连通域进行籽粒计数校正,实现了大豆籽粒的计数;使用单粒连通域的白色像素点总和来计算大豆籽粒面积,基于freeman链码算法的校正公式计算大豆籽粒周长,使用二阶统计矩求取大豆籽粒的主轴方向并将大豆扭到水平方向,继而计算大豆边界点横、纵坐标的极差来获取粒长与粒宽。用3份不同尺寸的大豆材料来验证本软件的精确性,试验结果表明,大豆籽粒计数准确率可达100%,软件测量与人工测量大豆籽粒的平均粒长和平均粒宽的误差普遍为0.01~0.04 cm,相对误差为3.8%~9.7%,平均相对误差为5.6%。该软件及相应的图像采集装置可以有效地满足农业科学研究工作的准确性要求,同时具有成本低廉,工作效率高的特点。

关键词:大豆籽粒图像;分水岭;计数;形态测量;软件开发

Measurement Method of Soybean Seed Morphological Parameters Based on Watershed and Statistical Moment

DING Qi¹, XU Wei¹, LI Meng², WANG Xiu-cheng², LU Wei¹, GAI Jun-yi², WANG Ling¹, XING Guang-nan²

(1. College of Engineering / Engineering Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. Soybean Research Institute / National Center for Soybean Improvement / MOA Key Laboratory for Biology and Genetic Improvement of Soybean (General) / State Key Laboratory for Crop Genetics and Germplasm Enhancement / Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to promote soybean cultivation and breeding, this study designed a software that can count accurately and measure the morphological parameters of soybean seed, such as area, perimeter, length and width. The color image of soybean seed and calibration plate were collected by high-speed photographic apparatus. The image background was removed based on the ‘Otsu’ threshold method to obtain the binary image of soybean seed. Based on the watershed transformation method, the adhesive soybean seeds in the binary map were segmented, and a series of single-seed and multi-seeds soybean connected domains were obtained. The seed count was corrected for a few multi-seeds connected domains, and then soybean seed count was achieved. The sum of white pixels in each connected domain is used to calculate the soybean seed area. The seed perimeter was calculated by using the correction formula based on the freeman chain code algorithm. The second-order statistical moment is used to obtain the main axis direction of the soybean seed and the soybean seed was twisted to the horizontal direction, and then we calculated the seed length and width by the extreme difference between the horizontal and vertical coordinates of the boundary point. The accuracy of the software was verified by three different sizes of soybean seed materials. The results showed that the accuracy of soybean seed count can reach 100%. Compared with manual measurement, the error of average seed length and average seed width of soybean seeds is generally 0.01–0.04 cm, the relative error was 3.8%–9.7%, and the average relative error is 5.6%. The software and the corresponding image acquisition device can effectively meet the accuracy of agricultural scientific research work with low cost and high work efficiency.

Keywords: Soybean seed image; Watershed; Counting; Morphometry; Software development

大豆是我国最重要的农作物之一,大豆籽粒是人类食用植物油和蛋白质的主要来源,在农业生产中占有重要地位。选育优良品种是获得高产优质大豆的关键,大豆单株粒数、粒长、粒宽和籽粒面积

等是大豆考种及育种工作中重要的形态参数,常用于评估该作物的产量和品质。

目前,大豆籽粒计数的方法主要有传统的人工计数法、百粒板法、半自动光电计数器^[1]以及图像

收稿日期:2019-05-13

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2016YFD0100201-22);国家自然科学基金(31571694);中央高校基本科研业务费专项资金(KYT201801);长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT_17R55);教育部111项目(B08025);农业部国家大豆产业技术体系(CARS-04);江苏省优势学科建设工程专项;江苏省JCIC-MCP项目;扬州市科技计划(YZ2018038);江苏省农机三新工程(SZ120170036)。

第一作者简介:丁琦(1996-),女,硕士,主要从事植物表型检测研究。E-mail: 2897876257@qq.com。

通讯作者:王玲(1966-),女,博士,副教授,主要从事机器视觉技术研究。E-mail: Lingw@njau.edu.cn。

邢光南(1980-),男,博士,副教授,主要从事大豆种质资源与大豆抗虫育种研究。E-mail: xinggn@njau.edu.cn。

处理法等。人工计数法、百粒板法和仪器测量法都耗时耗力,无法做到快速、准确、简便地测量形态参数。传统的大豆籽粒形态测量方法通常用游标卡尺测量粒长与粒宽和筛分法使用各种已知大小的圆孔筛对大豆种子进行筛分,此种方法费力耗时,它可能会损害种皮,影响种子的质量和可储存性^[2]。

随着计算机视觉技术的快速发展,图像处理法已被广泛用于农产品的质量检测^[3-5]。通过数码相机采集图像,对灰度图进行去噪、滤波处理,采用“Otsu”阈值法去除图像背景,基于连通域的数量求出大豆粒数,此方法只适用于不粘连的大豆籽粒^[6],未对粘连大豆籽粒计数进行探讨。利用 Mat-Lab 进行图像预处理、粒径统计、Freeman 链码提取、圆心定位、圆心筛选和聚类处理后,计算大豆的籽粒数^[7],此方法未分割粘连大豆籽粒,无法实现对籽粒形态参数的测量。大豆籽粒粘连问题不仅会影响到大豆籽粒的计数还会影响到大豆籽粒形态参数的测定,故需解决粘连籽粒图像分割的问题。

在实际测量过程中,由于测量样本多,为快速完成测量工作,大豆籽粒之间的粘连是不可避免的,手动分散需要较多时间,降低考种效率。因此,有人提出使用机械振动的方法将豆粒分散开来,再进行上述处理,但是此种方法很容易使采集图像模糊,需要额外的振动装置,且不能保证所有大豆籽粒的分离^[8]。使用图像处理的方法分割粘连谷物,国内外学者根据各种谷物的特征提出了多种方法,包括数学形态法^[9]、腐蚀和膨胀^[10]、颗粒轮廓曲率方法^[11-13]、椭圆曲线拟合法^[14]、特征融合法^[15]和分水岭分割法^[16-19]等,这些方法具有不同的特征,能在特定的情况下实现谷物的计数。但也有一些限制,腐蚀和膨胀的方法很容易损坏谷物的原始形状;轮廓提取和曲线拟合需要准确识别且计算效率低,一般只适用于少数颗粒的粘连^[13];对于集中摆

放集群大豆数粒,通过对灰度图求导、滤波、图像增强、提取感兴趣区域等处理^[20],未对计数精度进行讨论。采用改进类间最大方差二值化方法和欧氏距离变换相结合的方法解决大豆籽粒之间的粘连和孔洞问题,并采用区域种子点搜索方法对种子进行计数^[21],此种方法会使大豆籽粒图像失真而无法测量籽粒形态学参数。

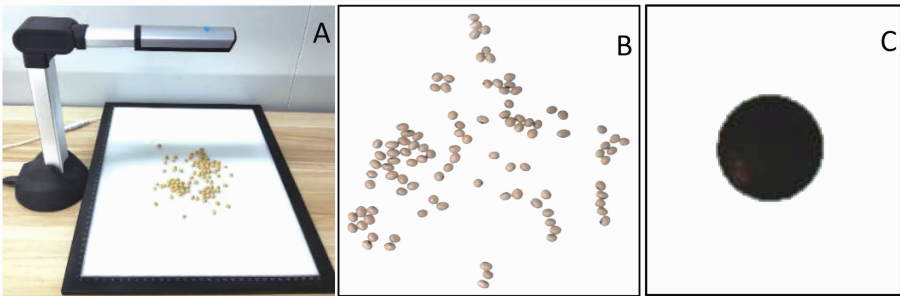
分水岭算法是一种比较常用的图像分割方法,该算法具有运算简单、易于并行设计等优点,所得图像边缘连续封闭、定位准确、单像素宽,应用比较广泛^[22-23],基于 H-Dome 重构的分水岭算法,先对大豆籽粒二值图像进行 H-Dome 灰度形态重构合并极值,再对重建后的图像用距离变换得到距离图像,然后利用分水岭算法进行图像分割^[24]。本文拟采用一种改进的分水岭变换法分割粘连大豆籽粒,以有效减少过分割现象,并进一步基于统计矩研究和验证大豆籽粒形态测量算法,以提高测量的准确性,同时开发一款快速、高效、无损的大豆籽粒计数及形态参数测量软件,为大豆籽粒考种及其外观品质检测提供一种简便的方法。

1 系统构建

1.1 图像采集与标定

将南农 1138-2 大豆籽粒放在高拍仪(良田)正下方的 LED 背光板上(图 1A),设置其亮度、对比度、白平衡等参数,同时调节背光板的亮度,采集清晰的大豆籽粒彩色图像(图 1B)。图像分辨率为 480 × 640,文件类型为 JPG。

将一元硬币涂成黑色,作为本试验的标定板放在背光板上进行图像采集(图 1C),用图像处理方法获得其二值图和边界轮廓图,由此计算出单位像素的长度比例尺为 0.046 4 cm、面积比例尺为 0.002 2 cm²、周长比例尺为 0.047 2 cm。



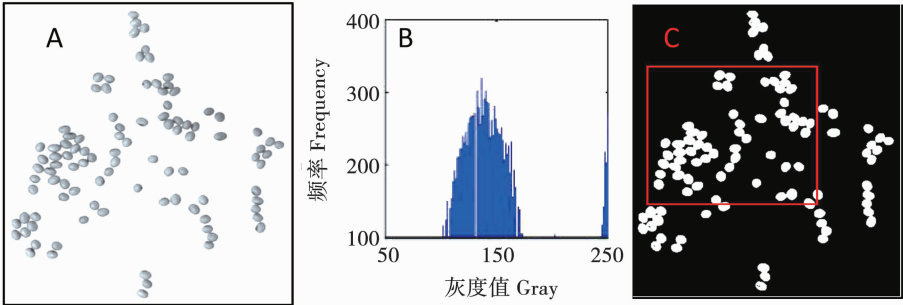
A: 图像采集装置;B:大豆籽粒彩色图像;C:标定板彩色图像。
A: Image acquisition device;B:Soybean seed color image;C:Calibration plate color image.

图 1 图像采集
Fig. 1 Image acquisition

1.2 大豆籽粒粘连分割

1.2.1 基于阈值法去除图像背景 将大豆籽粒彩色图像(图 1B)转换成灰度图像(图 2A),观察其灰度直方图(图 2B)可知,大豆籽粒灰度值普遍为 95 ~ 175,背景灰度为 250 左右,灰度直方图呈现明显的

波峰波谷形态,可基于“Otsu”自适应阈值法对灰度图像进行二值化处理,获取背景为 0 的大豆籽粒二值图像(图 2C),并基于数学形态学开运算去除部分连通域面积小于设定阈值 50 的噪声区域。



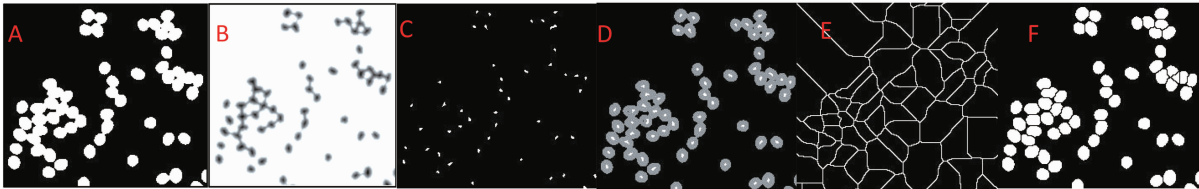
A:灰度图;B:灰度直方图;C:二值图。
A: Gray scale; B: Gray histogram; C: Binary image.

图2 大豆籽粒的图像预处理

Fig. 2 Image preprocessing of soybean seeds

1.2.2 基于分水岭变换法分割粘连籽粒 为更清楚显示籽粒粘连分割情况,截取图 2C 中红色方框区域的二值图(图 3A)进行距离变换,即对二值图中每个像素赋值为距离它最近的背景像素点的距离,得到一副距离图像(图 3B),若对距离图像直接进行分水岭分割,可能会存在许多局部最小区域,出现过分割现象;鉴于此,可考虑设定一个约束条件,依据大豆籽粒半径设定阈值,对图 3B 进行扩展

极小值变换,检测低于该阈值的亮度低谷区域并对距离图像的局部极小值进行滤波运算(图 3C),以确保找到大豆籽粒的中心区域(图 3D);基于此,对滤波后的距离图像进行分水岭变换^[23],获取基于距离图像的白色分割线(图 3E),将粘连的大豆籽粒分割成若干个连通域(图 3F),大多数单粒大豆对应 1 个连通域,极少数紧密粘连的多粒大豆构成 1 个连通域。



A:二值图;B:距离图像;C:距离图像滤波;D:模板叠加;E:分水岭变换;F:分割结果。
A: Binary image; B: Distance image; C: Distance image filtering; D: Template overlay; E: Watershed transformation; F: Segmentation result.

图3 大豆籽粒粘连的分割过程

Fig. 3 Segmentation process of soybean seeds with adhesion

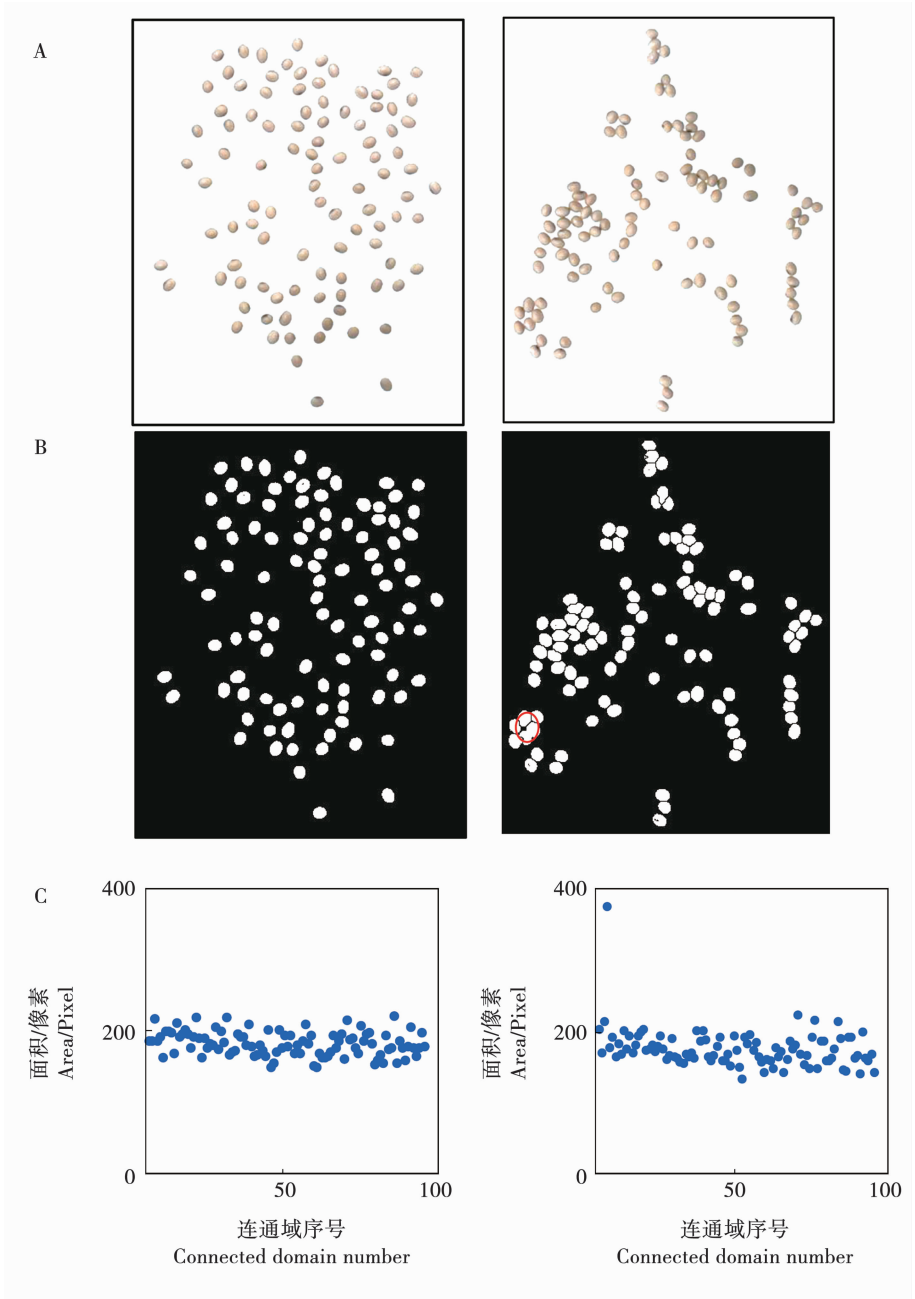
1.3 大豆籽粒形态参数测量

随机抓取、摆放在背光板上的大豆籽粒通常会粘连,分水岭变换法无法分割少数由密集粘连籽粒构成的连通域,这会使得大豆籽粒的计数以及形态参数的测量存在误差,需要设计一个周密的解决方案。

1.3.1 计数 下面以 100 粒大豆籽粒为例,分别采集其不粘连和粘连密集的彩色图像(图 4A),对其进行分水岭算法运算的分割结果二值图(图 4B)中,左图获得了 100 个连通域,其面积范围为 149 ~ 221 个像素,右图因存在一个粘连连通域而获得了 99 个连通域,连通域面积范围为 135 ~ 375 个像素(图 4C);虽然不同大豆品种的籽粒面积各异,但同一品种的籽粒面积基本一致,呈正态分布,以大豆

籽粒面积均值加 3 倍标准差为阈值剔除图像中粘连分割无效的连通域,获取全部单粒大豆的连通域,并计算图 4B 中全部单粒大豆的面积均值,左图 100 粒大豆面积的均值为 182.890 个像素、标准差为 17.178 个像素,右图 99 粒大豆面积的均值为 175 个像素、标准差为 18.665 个像素。

针对少数密集粘连大豆籽粒的计数问题,计算图 4B 中单粒连通域的面积均值和标准差,对于极少数面积大于大豆籽粒面积均值加 3 倍标准差的连通域,用其面积除以单粒大豆的面积均值,实现对粘连大豆籽粒计数的校正,确保大豆籽粒计数的准确性,左、右图软件计数结果均为 100 粒,与人工计数相符。



A: 彩色图像;B:分水岭分割结果,红色圆圈为粘连分割无效的连通域;C:连通域面积统计图。

A: Color image;B:Watershed segmentation results, invalid connection domain for adhesion segmentation;C:Connected area statistics.

图4 南农 1138-2 大豆籽粒形态测量

Fig. 4 The morphology measurement of Nannong 1138-2 soybean seeds

1.3.2 基于统计矩测量形态参数 基于统计矩测量单粒大豆二值图(图 5A)的形态参数,包括面积、周长、粒长、粒宽等距离参数。

大豆籽粒面积通过计算该二值图的零阶矩,即白色像素点个数为 188 个,根据面积比例尺 0.0022 cm^2 计算大豆籽粒面积为 0.4136 cm^2 。

大豆籽粒周长为通过 8 领域边界跟踪获得籽粒边界轮廓(图 5B),但不能仅通过边界图像的像素点求和来计算,原因是一些位于直线的像素为边缘贡献了较短的边,而位于对角线的像素为边缘贡献

较长边,而一些位于角点的像素为边界贡献了两条边。故选择基于大豆籽粒边界图像和 freeman 链码算法的经验公式,即公式(1)^[25],对周长 L 进行校正,其中 a 为偶数次像素数, b 为奇数次像素数, c 为角点像素数,基于 freeman 链码算法获得 a 、 b 、 c 的值分别为 26、16、18,基于像素点求和获得边界像素数为 42,校正后的周长像素数 P 为 46.338,根据周长比例尺为 0.0472 cm ,计算大豆籽粒周长为 2.187 cm 。

$$P = a \times 0.98 + b \times 1.406 - c \times 0.091 \quad (1)$$

大豆粒长和粒宽为主轴方向上的长轴和短轴长度,由于大豆籽粒是任意摆放的,大豆籽粒的主轴与水平方向存在一定的夹角,计算其长轴和短轴的算法具有一定的复杂性。选择统计矩的方法,即公式(2),通过大豆籽粒边界点坐标 (x_i,y_i) 和大豆籽粒质心坐标 (x_0,y_0) ,计算大豆籽粒边界的二阶中心矩参数 m_{11} 、 m_{20} 、 m_{02} ,进而获得大豆籽粒主轴与水平方向之间的夹角为 -39.9° ,据此使用旋转变换将大豆籽粒的主轴旋转至水平方向后(图5C),只需通过大豆籽粒边界横、纵坐标的极差来计算大豆粒长、粒宽,分别为18.155像素、14.055像素,大大提高了计算速度。根据长度比例尺0.0464 cm,计算大豆粒长和粒宽分别为0.842和0.652 cm。

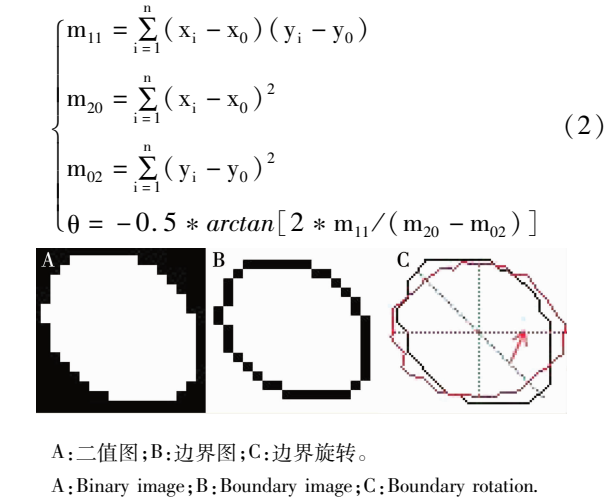


图5 大豆籽粒形态参数测量

Fig. 5 The measurement of soybean seed morphological parameters

选择图4B中左图的100粒单粒大豆和右图的剔除粘连籽粒后的98粒单粒大豆为试验对象。测量结果表明,图6A、图6B中单粒大豆的平均面积分别为0.401和0.384 cm²,平均周长分别为2.139和2.116 cm,平均粒长分别为0.795和0.791 cm,平均粒宽分别为0.669和0.656 cm,两者非常相近,进一步说明了本软件方法能处理分散与粘连两种情况且结果相似。

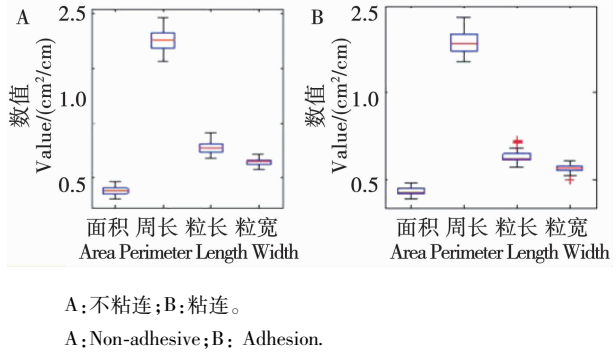


图6 大豆籽粒形态参数测量箱线图

Fig. 6 Box line diagram of soybean seed morphology parameter

1.4 系统实现

大豆籽粒简易计数及形态参数测量软件 V1.1 的 GUI 如图 7 所示,用户界面分为参数设置区、控制区和显示区。

参数设置区中区域最小值和去噪参数是默认的,区域最小值默认 0.6,去噪参数默认 50,可根据实际测量种子大小更改。操作流程为:输入标定物实际半径,点击“开始标定”按钮,选择标定板图像,标定比例尺框中显示面积、周长、粒长和粒宽的比例尺。

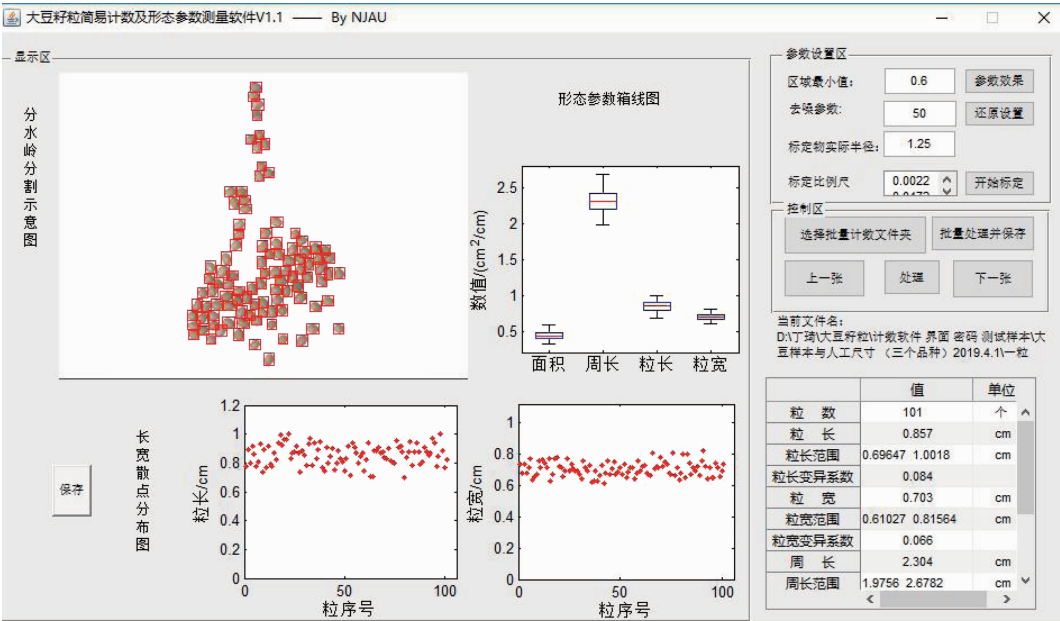


图7 大豆籽粒简易计数及形态参数测量软件 V1.1 的 GUI

Fig. 7 GUI of measurement software V1.1 for soybean seeds simple counting and morphological parameter

在控制区中点击“选择批量计数文件夹”,选择待处理大豆籽粒图像所在的文件夹,点击“处理”按钮则处理文件夹第一张图片,点击“上一张”“下一张”按钮切换图像,并点击“处理”按钮,可对文件夹中每张图片处理。若点击“选择批量计数文件夹”按钮后点击“批处理并保存”按钮,可实现对图像批量处理,并将测量结果自动保存为“. excel”文件。

在点击“处理”按钮后,软件对单张大豆籽粒图像进行上述图像处理(图8),显示区显示处理的结果,包括分水岭分割示意图、形态参数箱线图、粒长和粒宽的散点分布图,点击“保存”按钮可保存各个图;同时,界面右下方表格显示粒数、粒长范围、粒宽范围、粒周长范围和粒面积范围及各参数的变异系数。

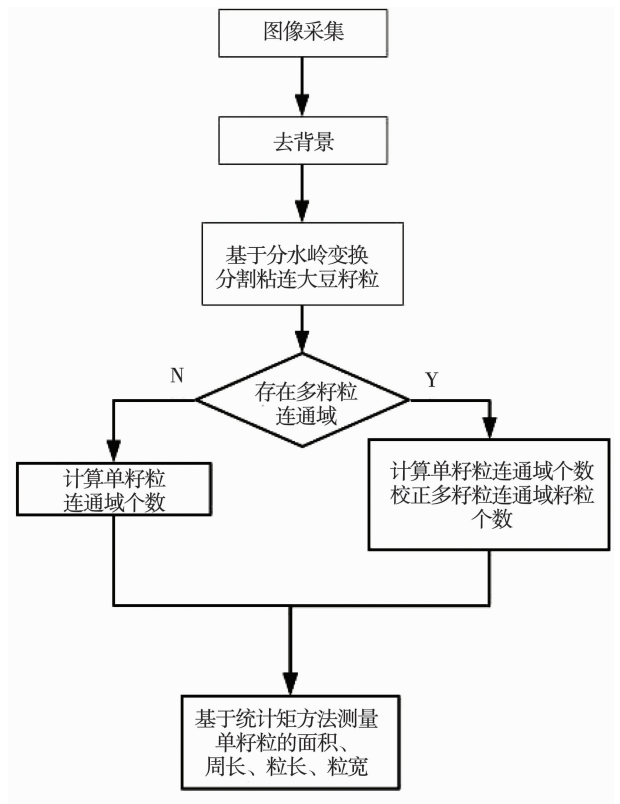


图8 大豆籽粒计数与形态参数测量算法流程图
Fig.8 Flow chart of soybean seed count and morphological parameter measurement algorithm

2 精准性验证

2.1 材料

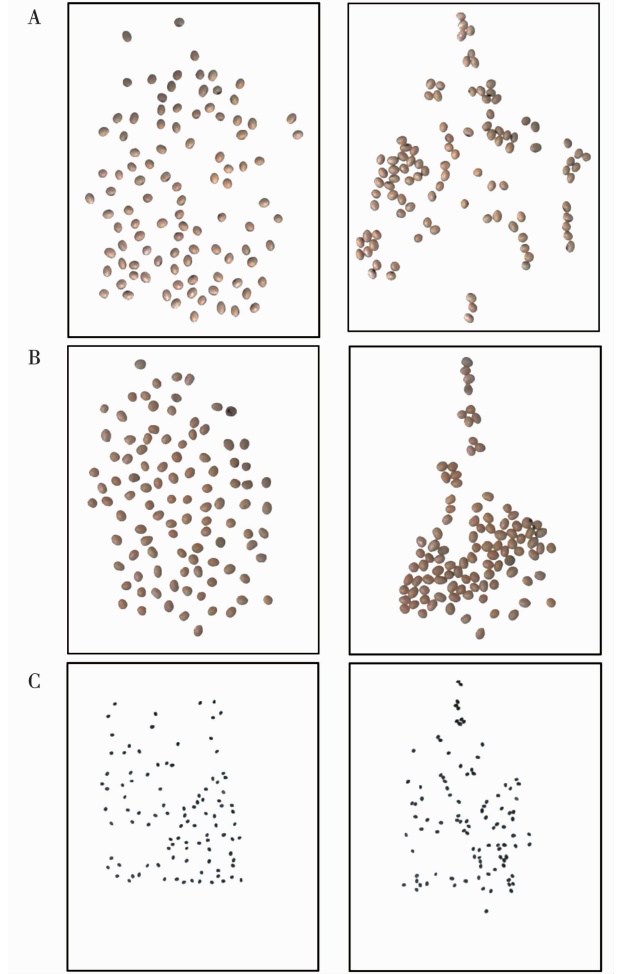
以南农 1138-2、一粒长和长岭野生大豆为试验对象,每份材料 100 粒左右。

2.2 方法

首先,使用游标卡尺测量每一粒大豆的粒长和粒宽并计算其平均值和标准差,然后基于相应的图像采集装置及上述构建的软件计算不粘连和密集粘连大豆籽粒的形态参数,并验证其精准性。

2.3 结果与分析

试验结果表明,在随机抓取大豆籽粒的情况下,测量籽粒大小差异很大的 3 份大豆材料的籽粒,软件计数分别为 100、101、100 粒(图 9),与人工计数相符,计数准确率可达 100%;3 份材料不粘连大豆籽粒平均面积分别为 0.401,0.471,0.066 cm²,平均周长分别为 2.139,2.338,0.781 cm,平均粒长分别为 0.795,0.860,0.332 cm,平均粒宽分别为 0.669,0.722,0.270 cm。比较软件测量与人工测量的结果,平均粒长和平均粒宽的绝对误差普遍为 0.01~0.04 cm,相对误差为 3.8%~9.7%,平均相对误差为 5.6%。粘连大豆籽粒测量结果与不粘连大豆籽粒相近,表明该软件适用于不粘连和粘连大豆籽粒的测量。由于大豆籽粒面积与周长人工测量操作繁琐且不准确,从而难以验证其误差大小,但通过粒长与粒宽可间接认为误差也较小。该软件计算速度快,能基本满足科研和广大基层育种工作者的需求并大大提高了他们的工作效率。



A:南农 1138-2;B:一粒长;C:长岭野生。
A: Nannong 1138-2; B: Yilichang; C: Changling wild soybeans.

图9 不同品种大豆籽粒在摆放稀疏和密集情况下的形态测量
Fig.9 Morphometry of different varieties of soybean seeds in sparse and dense manner

表 1 大豆籽粒计数和参数测量的误差分析

Table 1 Error analysis of the measurement of soybean seeds simple counting and morphological parameter

材料 Material	粘连 Adhesion	面积	周长	粒数			粒长			粒宽		
		Area	Perimeter	Seed number			Seed length/cm			Seed width/cm		
		/cm ²	/cm									
		软件 Software	软件 Software	人工 Manual	软件 Software	误差 Error	人工 Manual	软件 Software	误差 Error	人工 Manual	软件 Software	误差 Error
南农 1138-2 Nannong 1138-2	不粘连 Non-adhesive	0.401	2.139	100	100	0	0.757	0.795	0.038	0.626	0.669	0.043
	密集 Dense	0.384	2.116	100	100	0	0.757	0.791	0.034	0.626	0.656	0.030
一粒长 Yilichang	不粘连 Non-adhesive	0.471	2.338	101	101	0	0.826	0.860	0.034	0.680	0.722	0.042
	密集 Dense	0.451	2.304	101	101	0	0.826	0.858	0.032	0.680	0.703	0.023
长岭野生豆 Changling	不粘连 Non-adhesive	0.066	0.781	100	100	0	0.318	0.332	0.014	0.245	0.270	0.025
wild species	密集 Dense	0.065	0.783	100	100	0	0.318	0.334	0.016	0.245	0.269	0.024

3 讨 论

本研究开发的软件基于高拍仪获取噪声小的纯色背景图像,使用标准圆作为标定物获得比例尺参数。可批量处理样本图像并自动保存测量数据,也可对单张图片进行处理并观察大豆籽粒各个形态参数分布的箱线图。软件打包成使用方便的“.exe”文件,在 Matlab 2014a 运行环境中安装即可,软件及设备成本低廉,能基本满足科研和广大基层育种工作者的需求,特别适合于大豆籽粒考种工作。同时软件界面设计人性化,并且可移植到其它类圆形种子的计数及形态参数的测量。但是该软件对于紧密粘连的类圆形籽粒,使用分水岭分割后会对种子的形态参数产生一定的影响且不适用于形状不规则籽粒的测量。后续的研究设计中会逐渐完善现有不足,开发设计出更精确、便捷和适用性更广的籽粒形态测定软件。

4 结 论

本研究基于 MATLAB R2014a 编程开发了一款有操作界面且可免费获取的大豆籽粒简易计数软件,其具有经济方便、精度较高、快速准确、高效实用和操作简单等特点,可用于大豆籽粒计数、形态参数的测量,为大豆籽粒考种及其外观品质检测提供了一种简便的方法。该软件可实现对大小不一的大豆籽粒计数及面积、周长、粒长、粒宽等形态参

数的测量。考虑到人工抓取大豆籽粒放置的随机性,会存在籽粒之间的粘连,采用基于分水岭变换法对粘连大豆籽粒分割计数,该算法适用于对类圆形物体的粘连分割,分割效果好,避免了过分割的现象,计数时用面积阈值方法校正少许未分割的粘连籽粒,从而保证了计数准确率可达 100%。使用基于边界的统计矩方法测量形态学参数,计算量小,可提高软件的运行速度。软件测量与人工测量粒长和粒宽的误差普遍在 0.01 ~ 0.04 cm,相对误差在 3.8% ~ 9.7%,平均相对误差仅为 5.6%,由于人工测量存在一定的误差,故平均相对误差应小于 5.6%,表明了软件对形态参数测量的准确性。另外,由于根据大豆籽粒的面积、周长进行人工测量极其麻烦,该软件对籽粒面积、周长测量功能的实现可为研究者提供较为准确的数据参考。

参考文献

[1] 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. (Yun Y, Bao G J, Yang Q H, et al. Automatic segmentation method of adhesive corn grain image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 163-167.)

[2] 韩明, 刘教民, 孟军英, 等. 结合局部能量与改进的符号距离正则项的图像目标分割算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2047-2054. (Han M, Liu J M, Meng J Y, et al. Image object segmentation algorithm combining local energy and improved symbol distance regularization [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(9): 2047-2054.)

[3] Lu Y L. Study for automatic grain insect counting system based on

- image processing [J]. Microcomputer Information, 2008, 23 (24): 311-312.
- [4] Ciontault F, Guerin D, Guillemain J P, et al. Infield triticum aestivum ear counting using colour-texture image analysis [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2008, 36 (2): 117-130.
- [5] 王润涛, 张长利, 房俊龙, 等. 基于机器视觉的大豆籽粒精选技术 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (8): 355-358. (Wang R T, Zhang C L, Fang J L, et al. Soybean grain selection technology based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (8): 355-358.)
- [6] 李琼, 姚遥, 杨青春, 等. 基于 MATLAB 图像处理的大豆颗粒检测方法研究 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (30): 20-25. (Li Q, Yao Y, Yang Q C, et al. Study on the detection method of soybean granules based on MATLAB image processing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34 (30): 20-25.)
- [7] 戴文华, 吴翔, 裴正军, 等. 基于圆心定位的籽粒计数方法研究 [J]. 农机化研究, 2015, 37 (7): 198-202. (Dai W H, Wu X, Qiu Z J, et al. Study on grain counting method based on center positioning [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37 (7): 198-202.)
- [8] Zhao P, Li Y. Grain counting method based on image processing [C]//2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009: 1-3.
- [9] 孙晓婷, 陈江红. 基于形态重构的豆粒分割算法 [J]. 福建工程学院报, 2014, 12 (1): 70-73. (Sun X T, Chen J H. Bean segmentation algorithm based on morphological reconstruction [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2014, 12 (1): 70-73.)
- [10] 贾鹏, 李永奎, 赵萍. 基于 Matlab 图像处理谷物颗粒计数方法研究 [J]. 农机化研究, 2009, 31 (1): 152-153, 156. (Jia P, Li Y K, Zhao P. Study on grain particle counting method based on Matlab image processing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31 (1): 152-153, 156.)
- [11] Wang Y C, Chou J J. Automatic segmentation of touching rice kernels with an active contour model [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47 (5): 1803-1811.
- [12] Tian J Z, Tie Z Z, Li Y, et al. Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (9): 164-168.
- [13] Jung Y M, Kang S H, Shen J. Multiphase image segmentation via Modica - Mortola phase transition [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2007, 67 (5): 1213-1232.
- [14] 李恺. 基于数字图像处理的颗粒分析系统 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2015. (Li W. Particle analysis system based on digital image processing [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2015.)
- [15] 黄小玉, 李光林, 马驰等. 基于改进判别区域特征融合算法的近色背景绿色桃子识别 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (23): 142-148. (Huang X Y, Li G L, Ma C, et al. Green peach recognition in near-color background based on improved discriminant region feature fusion algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (23): 142-148.)
- [16] 杨蜀秦. 大米外观品质计算机视觉检测的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005. (Yang Y Q. Research on computer visual inspection of rice appearance quality [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2005.)
- [17] Visen N S, Shashidhar N S, Paliwal J. Identification and segmentation of occluding groups of grain kernels in a grain sample image [J]. Journal of the Agricultural Engineering Research, 2001, 79 (2): 159-166.
- [18] Zhang G. Separation of touching grain kernels in an image by ellipse fitting and morphological transform algorithm [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92 (2): 135-142.
- [19] Long Z Q, En C J. Automatic segmentation method of touching corn kernels in digital image based on improved watershed algorithm [C]//2011 International Conference on New Technology of Agricultural. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011: 34-37.
- [20] Barbedo J G A. Counting clustered soybean seeds [C]//2012 International Conference on Computational Science and Its Applications. Taian: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 142-145.
- [21] 陈静, 朱伟兴, 苏威. 基于机器视觉的种子千粒重测定系统的设计 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (9): 97-99. (Chen J, Zhu W X, Su W. Design of seeding 1000-grain weight determination system based on machine vision [J]. Sensors and Microsystems, 2008, 27 (9): 97-99.)
- [22] 王小鹏, 陈璐, 吴双. 基于面积约束和自适应梯度修正的分水岭图像分割 [J]. 光电子·激光, 2014, 25 (11): 2219-2226. (Wang X P, Chen L, Wu S. Watershed image segmentation based on area constraint and adaptive gradient correction [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25 (11): 2219-2226.)
- [23] 孙晓婷, 陈江红, 陈庆周. 基于 H-Dome 重构的大豆图像分割 [J]. 大豆科学, 2013, 32 (6): 821-824. (Sun X T, Chen J H, Chen Q Z. Image segmentation of soybean based on H-Dome reconstruction [J]. Soybean Science, 2013, 32 (6): 821-824.)
- [24] Shahin M A, Symons S J. Seed sizing from image of non-singulated grain samples [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2005, 47 (3): 49-55.
- [25] Vossepoel A M, Smeulders A W M. Vector code probability and metrication error in the representation of straightlines of finite length, Computer Graphics and Image Processing, 1982, 20 (4): 347-364.