

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.02.040

张伟进, 王福顺, 孙小华, 等. 传统图像分割算法在农作物籽粒考种应用中的研究进展[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 280-287

Zhang Weijin, Wang Fushun, Sun Xiaohua, et al. Research progress of traditional image segmentation algorithm in seed testing of crops [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 280-287

传统图像分割算法在农作物籽粒考种应用中的研究进展^{*}

张伟进¹, 王福顺^{1, 2}, 孙小华³, 王军皓¹, 刘宏权⁴, 王鑫鑫^{5, 6}

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 河北保定, 071001; 2. 河北省农业大数据重点实验室, 河北保定, 071000; 3. 河北软件职业技术学院数字传媒系, 河北保定, 071000; 4. 河北农业大学城乡建设学院, 河北保定, 071001; 5. 河北省山区农业技术创新中心, 河北保定, 071001; 6. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北保定, 071001)

摘要:传统图像分割算法以时间、空间复杂度低等优点在农作物籽粒考种领域中有着广泛的应用。对传统分割算法在农作物表型获取过程中的应用进行研究, 首先阐述 Otsu、分水岭、边缘检测、SLIC 算法以及凹点分析算法的算法原理, 对种皮颜色灰度均匀、形状不同的农作物籽粒, 以“问题—方法”的模式阐述不同算法在应用中存在的问题以及相应的解决方法; 接着将算法基于阈值、区域、边缘、聚类、凹点整合为五大类, 对算法的分割效果、优缺点及其适用范围进行比较研究; 最后, 剖析农作物籽粒图像分割应用研究存在农作物种类覆盖度不够宽泛、图像分割精度不高、技术通用性不高等问题, 并从算法精度提高、重叠遮挡处理等方面对未来的研究进行展望, 以期对农作物籽粒考种过程中的图像分割研究提供参考。

关键词: 考种; 籽粒表型; 信息获取; 图像处理; 图像分割

中图分类号: TP391; S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 02-0280-08

Research progress of traditional image segmentation algorithm in seed testing of crops

Zhang Weijin¹, Wang Fushun^{1, 2}, Sun Xiaohua³, Wang Junhao¹, Liu Hongquan⁴, Wang Xinxin^{5, 6}

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China; 2. Hebei Key Laboratory of Agricultural Big Data, Baoding, 071000, China; 3. Department of Digital Media, Hebei Software Institute, Baoding, 071000, China; 4. College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China; 5. Agricultural Technology Innovation Center in Mountainous Areas of Hebei Province, Baoding, 071001, China; 6. Agricultural Engineering Technology Research Center of National North Mountainous Area, Baoding, 071001, China)

Abstract: Traditional image segmentation algorithm has been widely used in the field of crop seed testing because of its low complexity in time and space. The application of traditional segmentation algorithm in the crop phenotype extraction was studied in this paper. Firstly, the algorithm principles of Otsu, watershed, edge detection, SLIC and concave point analysis algorithm were expounded. For crop seeds with uniform seed coat color and different shapes, the problems in the application of different algorithms and the corresponding solutions were described in the model of ‘problem-method’. Then the algorithms were integrated into five categories based on threshold, region, edge, cluster and concave point, and the segmentation effect, advantages and disadvantages and application range of the algorithm were compared. Finally, the problems in the application of crop seed image segmentation were analyzed, and the future research directions were prospected from algorithm accuracy improvement and overlapping occlusion processing, in

收稿日期: 2022年5月17日 修回日期: 2022年7月11日

^{*} 基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系—食用豆(CARS—08—G—22); 河北省高等学校科学技术研究计划(QN2020421)

第一作者: 张伟进, 女, 1999年生, 河北涿鹿人, 硕士研究生; 研究方向为图像处理与数据挖掘。E-mail: 1280105172@qq.com

通讯作者: 王福顺, 男, 1981年生, 河北景县人, 博士, 副教授; 研究方向为大数据分析与管理, 信息智能化处理。E-mail: xxwfs@hebau.edu.cn

order to provide reference for the research of image segmentation in the process of crop seed testing.

Keywords: seed testing; seed phenotype; information acquisition; image processing; image segmentation

0 引言

图像分割是将图像分成若干具有相似性质区域的过程^[1],是由图像处理向图像分析过渡的关键步骤,常用于机器视觉^[2]、行为检测^[3]、卫星图像处理^[4]和医学影像处理^[5]等众多方面。随着图像处理技术的不断优化改进,逐渐渗透到农作物品质研究过程中,例如农作物表型的获取与分析^[6]、目标检测计数^[7]、品种分类和品质分级^[8]以及籽粒千粒重测定^[9]等方面。农作物籽粒品质的优劣直接影响农作物的生长状况以及最终的产量,因此对籽粒进行考种是非常有必要的。传统考种手段例如使用游标卡尺测量籽粒的长宽,使用天平测量籽粒的重量,劳动强度大、容易出现误差,且容易对籽粒造成损害,使用人工手段无法精确测量籽粒周长、面积和圆润度等参数,严重影响获取籽粒表型信息的效率^[10],而图像处理技术可以无损、快速地分析籽粒图像,精确获得籽粒的形态、颜色以及纹理等表型数据,且不会对籽粒造成任何损害,因此将图像处理应用到考种过程中可以在一定程度上提高考种效率,基于图像处理技术获取农作物籽粒表型已成为研究热点^[11]。图像分割作为图像处理过程中至关重要的一步,在考种研究中发挥着不可或缺的重要作用,采集的籽粒图像不能直接获得其表型数据,首先应该对图像进行预处理及分割,只保留需要计算的籽粒部分,图像分割效果的优劣关乎后续的数据计算精度,直接影响信息的准确性。例如籽粒间的粘连会导致计数、形状以及面积等方面的各种误差,影响表型信息的精准提取,因此通过图像分割算法将重叠或粘连的籽粒分离,以更好地提取单个籽粒的表型信息是非常必要的。

在众多的传统图像分割方法中,基于阈值的分割^[12]、基于区域的分割^[13]、基于边缘的分割^[14]、基于聚类的分割^[15]以及基于凹点的分割^[16]等算法是在籽粒图像处理中应用较为广泛的算法。基于阈值的分割算法是图像分割中的经典算法,其关键点在于最优阈值^[17]的选取,阈值的选取是否合理直接影响图像分割效果的优劣^[18],其中 Otsu 算法(最大类间方差法)对灰度值类间方差为单峰的图像产生很好的分割效果^[19]。基于区域的分割算法中分水岭算法是最常用于农作物籽粒图像分割的算法,其关键点在于通过准确地获取真正的极小值,以获取真正的边界^[20]。基于边缘的分割算法通过标识图像中亮度变化明显的点来确定图像的边缘,其关键点在于临界值灰度梯度计算。

基于聚类的分割算法将图像的像素点划分为多个子集,每个子集内部拥有相同的公共属性^[21],其关键点在于簇中心选择与距离的确定,其中 SLIC 算法^[22](简单线性迭代聚类算法)将图像以超像素^[23]为最小单元进行迭代聚类,减小了计算复杂度也可以消除部分噪声点的影响。基于凹点的分割算法主要用于分割粘连图像,其关键点在于检测图像中的凹点并将凹点进行匹配。凹点分析算法使用灵活,大多用于其它分割算法之后,对粘连区域进行二次分割。

对于算法性能方面,黄鹏等^[24]系统梳理了基于阈值、边缘、区域等传统分割算法以及基于深度学习的 FCN、PSPNet、R-CNN 等网络模型的分割算法,并在常用数据集上对同类方法进行比较分析。张轩等^[25]对比了阈值、边缘、分水岭分割算法在分割粘连颗粒图像上的表现,肯定了分水岭算法的有用性,并给出了引入评价机制的建议。高辉等^[26]重点阐述了基于分水岭、凹点、U-Net 语义分割三种分割方法在粘连图像处理中的应用,得出传统分割算法的外界环境需固定、待处理图像的信息需简单以及分类分割过程需相对独立等缺点,而深度学习分割算法具有较强适应性的结论,并给出结合传统分割算法与深度学习分割算法以适应不同的应用场景的建议。

本文主要阐述 Otsu 算法、分水岭算法、边缘检测算法、SLIC 算法以及凹点分析算法等传统图像分割方法在农作物籽粒考种中的应用,对其在种皮灰度均匀、形状各样的籽粒图像上的分割效果进行详细解析,并根据试验结果对比分析各算法的分割效果及优缺点,为基于图像处理的考种过程中图像分割算法的运用提供一定的参考。

1 籽粒考种常用传统图像分割算法

1.1 Otsu 算法

Otsu 算法基于聚类的思想,通过计算灰度值方差确定最佳阈值来二值化图像^[27],将图像整体分为两个灰度级,使两级之间灰度差最大,同级之间灰度差最小。

对于籽粒间不存在粘连的非复杂图像,采用 Otsu 算法分离花生(*Arachis hypogaea* L.)种子图像前景与背景,再通过孔洞填充算法填充噪声^[28],由于花生籽粒外形圆润、轮廓光滑,因此分割效果相对较好。采用 Otsu 算法分离玉米(*Zea mays* L.)籽粒和小麦(*Triticum aestivum* L.)籽粒前景与背景^[29-30],都可最大程度地保证图像信息的完整性,但存在多余的噪声

点,需结合形态学操作等消除噪声点。而对于较大面积的噪声区域,形态学操作可能会引入较大误差,采用 FillInternal Contours 算法填充低于 Otsu 算法确定的最优阈值的像素点,可以有效地消除小桐子 (*Jatropha curcas* L.) 种子二值图中的大面积噪声区域^[31]。针对图像中较暗的部分直接进行阈值分割可能会被误判为背景,对原图进行 MSRCR 等算法增强^[32],再用 Otsu 算法进行分割,也可以更好地保留大米籽粒的前景图像。

Otsu 算法对不存在粘连的籽粒图像可以轻松地分离图像的前景与背景,得到边界较好的单粒图像,对边缘平滑的籽粒图像分割效果明显高于外形不规则的籽粒图像,但对种皮颜色灰度不均的籽粒图像可能会造成边界丢失、模糊等问题,需要结合滤波去噪或边缘强化等操作以更好保留完整的边界;对存在粘连的复杂图像,通过简单的阈值分割往往不能实现籽粒的分割,得不到预期分割效果,所以 Otsu 算法通常与其它算法结合应用以更好地分离出单粒籽粒。

1.2 分水岭算法

分水岭算法基于测地学拓扑地形的概念,是将图像分割看成一个三维地形图^[33-34],在相邻两个峡谷的交界处建立一座水坝,即分水岭^[35],将图像划分成像素强度相似的若干区域,其工作原理如图 1 所示。

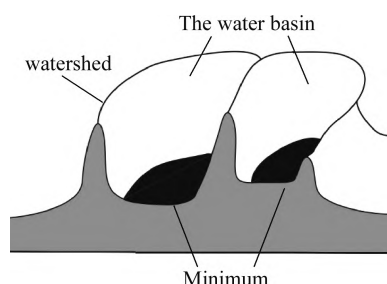


图 1 分水岭算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of watershed algorithm

对于灰度分布均匀的图像,例如规则的大豆 (*Glycine max* L.) 籽粒图像、颜色均匀的大米籽粒图像以及纹理均匀的小麦籽粒图像等,分水岭算法可以实现较为准确的分割;反之,对于灰度分布不均匀的图像,例如种皮颜色不均匀的玉米籽粒图像、种脐与种皮颜色差异较大的红豆 (*Abrus precatorius* L.) 籽粒、纹理不均的大米籽粒等图像,生成的距离图中会出现多余的颈脊,在分水岭变换时会导致图像的过分割。

解决过分割问题大致有两种方法,第一种方法是通过增加限制参数来消除这些颈脊^[34],结合标记控制分水岭算法与分割和合并分水岭两步方法,使用单粒特征如大小、面积和凸度等来识别过分割的区域以消除分裂,以在过分割和欠分割之间取得适当的平

衡^[36];利用选择性极限腐蚀得到的内核作为标记符限制分水岭划分区域数目,对原梯度图像施加强制极小值,可以有效抑制分水岭算法的过分割程度^[37];用圆形结构对籽粒二值图像进行超蚀,保留每个像素的最大值作为距离函数,再模拟分水岭算法对不同距离的图像做标记,根据不同的侵蚀结构元素,得到这些标记图像中每个流域点的概率,从而保留真实分水岭^[38],有效去除分水岭算法产生的伪极小值,也能有效改善过分割现象。第二种方法是在进行分水岭变换之前对图像的灰度梯度进行调整^[39],对二值图像进行距离变换生成伪梯度图^[40],可以有效消除伪极小值;采用 D-Home 灰度重建^[41]的方法,重新建立前景的灰度梯度, m 和 f 代表同一离散域 D 上的两个灰度图像,且满足

$$m \leq f[\forall p \in D, m(p) \leq f(p)] \quad (1)$$

则用 m 对 f 的灰度重建可表示为

$$\forall p \in D, \rho_f(m)(p) = \max[k \mid p \in \rho_{T_k(f)}(T_k(m)), k \in \{0, n-1\}] \quad (2)$$

其中, $T_k(f) = \{p \mid p \in D, f(p) \geq k\}$, $f(p)$ 是 p 点在图像 f 中的灰度值。上述应用证明这两种改善分水岭算法过分割现象的思路在算法上都是可实现的,并且可以取得较好的效果,对于不同的应用场景,往往会根据籽粒的自身特点而选择不同的方法进行处理。分水岭算法对灰度值的轻微变化很敏感,背景中的噪声、籽粒种皮细微的灰度变化,都会导致过分割现象的出现,即便是种皮颜色均匀的籽粒表面也可能存在灰度的微弱变化,所以采取一定的方法改善过分割的现象是非常有必要的。根据籽粒自身的种皮颜色和形状特点选用合适的方法改善过分割现象,分水岭算法可以很好地应用到籽粒图像的分割当中。分水岭算法经常被用来与其它前导算法相结合进行图像分割,本质上都是对灰度不均进行处理,以消除假的分水岭,得到更好的分割效果。

1.3 边缘检测算法

籽粒图像边缘是图像分割的重要依据^[27],边缘检测算法主要分为两类,其中微分算子法是通过模板卷积计算一阶或二阶导数来找出图像中灰度突变的边界^[42],常用的算子有 Canny、Roberts 和 Laplacian 等,其中 Canny 算子因适用性更强,能保留更多的边缘信息而广泛应用于籽粒分割当中,而传统 Canny 算子边缘检测对细小噪声抑制效果不佳,需要人为设定高低阈值^[43],容易引入误差,将 Otsu 算法的自动确定阈值方法应用于高低阈值的计算中^[44]可以提高提取精度。针对 Canny 算子会产生假边缘和丢失局部边缘的问题,将信息熵结合到 Canny 算子的极值的计算过程当

中,当信息熵达到峰值时,计算阈值作为 Canny 算子的分割阈值得到大米的边缘轮廓,在对完整的大米籽粒或破损籽粒都能很好地提取出边缘的同时,还消除了假边缘的影响。

在籽粒表型信息获取的过程中最重要的就是准确地获取籽粒的边缘,以精确地计算形状、面积等表型数据,所以边缘检测算法被广泛地应用于籽粒的图像处理过程中。依据需求选择合适的微分算子对图像进行卷积计算,以期获得清晰、信息完整的籽粒边界,无论对图像进行进一步分割或是提取特征,边缘检测算法保留的图像边界都可以为后续的处理奠定良好的基础。

1.4 SLIC 算法

SLIC 算法^[45]对一些邻近且属性相近的像素应用 K-means 聚类算法形成相同颜色的像素簇^[46],对图像做超像素分割可以降低计算复杂度,同时也可以去除噪声点的影响。农作物籽粒种皮内部颜色差异度小,对种皮内部像素逐个进行计算无疑会增加计算量,通过颜色相同形成像素簇可以大大减少时间与空间复杂度。首先将图像划分成均匀的网格^[47],取网格中心为聚类中心点开始聚类,为四周像素点分配与其距离最近的聚类中心的类标签,同一类别所有像素点的特征均值向量成为下一次迭代运行的聚类中心^[48]。

由于传统 SLIC 需要人为给定超像素个数,可能会给分割结果造成一定的主观影响,利用图像的颜色信息等特征确定超像素个数,结合 DBSCAN 算法对超像素进行聚类^[49],算法的过分割率与欠分割率成正比,且随着超像素的个数逐渐增大,过分割率与欠分割率都逐渐减小并趋于平稳,相对于原始 SLIC 算法分割效率有所提高。对于籽粒间存在粘连的图像,利用 SLIC 算法对大米图像进行初步分割后,对图像进行颜色空间的转换,根据一定的阈值条件,计算像素所占比例,对超像素进行标记^[50],分割后籽粒的边缘保留较为完整。

聚类分割算法将某些具有相同属性的像素聚集在一起从而实现分割,对籽粒的形状没有严格的要求,但籽粒种皮的颜色可能会对算法结果产生一定的影响,种皮颜色灰度均匀的籽粒可以得到非常好的效果,种皮颜色灰度不均的籽粒可能会出现图像的过分割。基于超像素分割的 SLIC 算法相对于一般聚类算法提高了计算效率,在一定程度上改善了过分割现象,提高了分割效率。但初始参数的变化对聚类分割算法的性能影响很大,在不同的应用场景有时需要人为初始化参数,以更快地找到整体最优解,提高分割效率,因此如何优化聚类分割算法的初始化参数确定算法仍需进行深入研究。

1.5 凹点分析算法

凹点分析算法作为其他算法分割结果的接续处理算法,具有不可忽视的重要作用。凹点分析算法包括凹点检测与凹点匹配两个过程,即首先对粘连位置进行识别提取,再通过对凸包进行分析计算出真正的凹点,最后根据一定的规则将对应的凹点匹配连接,实现粘连区域的分割^[51]。粘连的籽粒外侧轮廓形成的凸包,根据凸包的特点找到粘连位置的凹点,依据最短欧氏距离匹配可以实现籽粒的有效分割。

凹点检测算法大致分为两种,一种是以模板遍历轮廓。采用正方形或圆形模板沿区域轮廓进行检测,以轮廓上的点为模板中心,按照一定的规则,例如计算模板中籽粒部分面积占模板总面积的比例,作为该轮廓点的特征值,粘连处的 R 值明显高于其他位置的值,由此找到粘连的位置^[52-54]。另一种则是依据点与点的关系。很多籽粒轮廓接近于圆形,因此圆形颗粒的分割所使用到的方法对圆形籽粒的分割可能具有一定的参考价值,结合矢量面积、位置和凹度三个参数进行凹点的判断,当轮廓上的当前点、其前驱点与后继点构成的三角形矢量面积为正,前驱点与后继点的连线在轮廓外侧,且凹陷程度达到一定阈值时,判断此凹点为真凹点。对于不同粘连类型的凹点都有良好的检测效果,该算法对圆形颗粒粘连的凹点检测具有可观的效果,对圆形籽粒的分割具有很好的借鉴意义^[55]。对于非圆形籽粒如大米、玉米等图像的分割,计算轮廓上相邻三点所形成的夹角,随着步长加大,当前点、前驱点和后继点三点连线的夹角越大且夹角内侧的图像是背景时证明当前点为真正的凹点,再通过 K-means 聚类将凹点分类,根据两点间最短距离准则实现凹点匹配^[56],存在粘连的复杂图像的分割不能只依赖于单一算法,需要结合多种算法进行分割。

关于凹点匹配算法,目前使用最多的是最短欧氏距离匹配规则^[57]。由于边界不平滑和籽粒自身的特点,检测结果中可能会存在一部分伪凹点,伪凹点的存在会造成后续凹点匹配的误差,因此伪凹点的消除也是重要的一步,以检测出的所有凹点为中心计算每个凹点的矢量夹角与平角的差值^[58],差值大于 90° 的点判定为真凹点,以此删除大米籽粒头部的伪凹点,留下正确的凹点。

凹点分析算法可有效分割籽粒间的粘连,提取轮廓后检测出凹点并将其正确匹配,实现粘连籽粒的分割,可以进一步提高分割效率,并且种皮颜色灰度对算法性能影响不大。按照籽粒边界的特点,选择合适的凹点检测算法,并将伪凹点准确排除,依据最短距离规则进行匹配,可以在误差允许范围内有效地分割籽粒

的粘连。

2 算法对比分析

五种分割算法在对籽粒进行分割时的应用条件和算法优势上各有不同,其中 Otsu 算法是应用最普遍的分割方法,经常与其它算法结合使用以得到更好的处理效果;分水岭算法是比较简便的分割算法,针对存在的过分割缺陷,提出了一系列的改进方法去改善;在提取

图像边缘信息时经常采用边缘检测算法,其中 Canny 算子因其可保留更多地边缘信息而应用最为广泛;SLIC 算法是基于超像素的分割算法,体现了最优的边界依从性。将图像分成网格分别进行聚类,减少了优化中距离的计算量;对于图像中可能存在的粘连情况,凹点分析算法可以有效地分割粘连区域,可以有效地减少欠分割所造成的影响,减小数据误差。各分割算法的分割效果、优缺点及其适用范围比较如表 1 所示。

表 1 籽粒图像分割效果比较
Tab. 1 Segmentation effect comparison of seed image mentioned

算法	优点	缺点	适用范围
基于阈值的分割	计算量小、可以最大程度地压缩数据,性能较稳定	复杂图像分割效果不好、耗时长	不含粘连的、种皮颜色均匀的、边界光滑的籽粒图像分割
基于区域的分割	对微弱边缘响应良好,计算简单、适用范围广	易产生局部极小值,出现过分割现象	对是否粘连、颜色和边界平滑程度无要求
基于边缘的分割	检测灰度级或者结构突变	不适合复杂图像	不含粘连的籽粒图像、对种皮颜色无要求,适用于噪声比较小的图像
基于聚类的分割	像素点的个数与算法的运行时间成正比,线性复杂度低	可能保留不属于聚类中心“孤立”像素	对是否粘连、颜色和边界平滑程度无要求
基于凹点的分割	速度快、精度高,针对粘连区域有效分割	不适当处理伪凹点,会存在一定误差	主要针对粘连区域,对颜色和边界平滑程度无要求,常作为其它分割算法的接续处理算法

3 存在问题

农作物籽粒品质是衡量农作物生产效益的重要指标之一。通过考种了解农作物产量、品质和抗病性等情况,为农业生产决策提供科学依据,对提高作物品质具有重要指导意义。当前以图像处理为技术基础的高效考种试验及作业中还存在一些问题。

1) 农作物种类覆盖度不够宽泛。在玉米、水稻、小麦等主要谷类作物和大豆、花生、油菜籽等主要油料作物上的研究成果较多,在实验室以及实际田间环境中也取得了良好的表现。但针对小豆、棉花、油料、麻类、桑柞丝等经济作物,以及饲料及绿肥作物、药用作物和调味品作物等其他重要作物的研究成果较少,且成果普及程度不高。

2) 图像分割精度不高。目前针对某些目标作物所用算法在精度方面仍存在一些不足,例如边界损失和像素损失等,增大表型信息提取过程中的计算误差,影响考种结果。

3) 技术通用性不高。在现有籽粒图像分割方法研究成果中,算法大多针对性地面向一种或一类作物籽粒进行开发,在其目标籽粒上可以取得良好分割效果,但将其直接迁移至其他种类作物籽粒上的分割效果不佳,增加了生产成本。

4 展望

我国耕地面积广大,农作物种类繁多。随着我国

农业现代化进程的有序推进,农业高质量发展对农业机械化和现代化以及种子种业技术的提升提出了更高的要求。在农作物籽粒图像处理任务中,对具体的图像分割场景,根据待分割籽粒图像的特点,例如籽粒间是否存在粘连、籽粒的边界是否清晰、籽粒是否存在种脐以及籽粒表皮颜色是否均匀等,灵活地选择分割算法,为了达到理想的分割效果,有时还需要将两种或多种分割算法相结合。针对以上问题,未来研究应以扩大目标作物选区范围,优化算法计算精度,提高算法泛化能力,扩展技术通用性为主要着手点,以改进和提升处理效果,更好地满足实际需求。

图像分割是图像处理过程中的重要步骤,在对图像进行预处理之后,通过图像分割获得良好的单粒图像可以为后续考种数据的提取奠定良好的基础,在大多数籽粒图像中,籽粒粘连情况经常存在,粘连处理操作不可或缺,所以需要选择合适的粘连分割算法对粘连图像进行处理,才能更精准地获取考种信息以及相关的计算数据。

1) 目前对于籽粒种皮颜色灰度均匀的籽粒图像分割研究较多,针对大米、小麦和大豆的分割算法已经达到一定水平,通过多种算法的结合基本可以克服在图像处理过程中出现的常见问题。但对诸如小豆、菜豆等种皮颜色与种脐颜色差异较大的籽粒图像研究较少,简单的图像分割不能保留完整的籽粒轮廓,以至于影响籽粒的特征提取和品质分级等步骤的计算精度,针对灰度变换的高精度识别研究急需加强。

2) 分水岭算法因其计算简便而广为应用,在一定条件下可以取得较好的分割结果,但在籽粒情况较为复杂的情况下,分水岭算法的过分割与欠分割现象会造成籽粒的计数误差和表型数据的计算误差,严重影响考种精度,如何从标记控制、修改距离图等方面着手,改善分水岭算法的分割效果还需进一步研究。

3) 目前应用图像处理技术进行考种,要求籽粒必须单层平铺摆放,不允许籽粒间存在重叠遮挡,但大规模考种情况下籽粒间很可能存在重叠遮挡的现象,通过人工手段或其它方法将籽粒改为单层平铺摆放,费时费力,影响籽粒的表型信息获取效率,如何处理存在重叠遮挡的籽粒图像,是提高考种工作效率的关键问题。

4) 随着图像分割技术的不断发展,其应用领域也逐渐扩展至许多农作物籽粒的处理当中,为追求更好的分割效果,在多种农作物考种方面的应用研究仍需丰富,结合已有算法或研究新算法来处理农作物籽粒图像,以及如何将不同算法有机结合并应用于复杂籽粒图像的处理也需要深入探讨。

参 考 文 献

- [1] Jiang Ziqi, Zou Feng, Chen Debao, et al. An improved teaching-learning-based optimization for multilevel thresholding image segmentation [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(9): 8371–8396.
- [2] Sawant A. Flower recognition system based on image segmentation algorithms [J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2020, 9(3): 685–688.
- [3] Jung S, Cho Y, Lee K T, et al. Moving object detection with single moving camera and IMU sensor using mask R-CNN instance image segmentation [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(6): 1049–1059.
- [4] Kotaridis I, Lazaridou M. Remote sensing image segmentation advances: A meta-analysis [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 309–322.
- [5] Divyameena S, Mangaleswaran M. A study on various image segmentation algorithms [J]. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2018: 272–276.
- [6] Koh J, Hayden M, Daetwyler H, et al. Estimation of crop plant density at early mixed growth stages using UAV imagery [J]. *Plant Methods*, 2019, 15(1): 1–9.
- [7] 吴文华. 基于图像的油菜表型参数测量方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Wu Wenhua. Study on measurement method of rapeseed phenotypic parameters based on image [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [8] Cui Dandan, Cui Guoxian, Yang Ruifang, et al. Phenotypic characteristics of ramie (*Boehmeria nivea* L.) germplasm resources based on UAV remote sensing [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2020, 68(2): 1–16.
- [9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 41–47.
- [10] 明雨阳. 基于图像处理的作物表型参量测量及生长状态监测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Ming Yuyang. Research on method of crop phenotypic parameter measurement and growth status monitoring based on image processing [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [11] 杨晓雪, 史晓刚. 计算机图像处理技术及其在农业工程中的应用[J]. *数字通信世界*, 2021(10): 45–46, 50.
Yang Xiaoxue, Shi Xiaogang. Computer image processing technology and its application in agricultural engineering [J]. *Digital Communication World*, 2021(10): 45–46, 50.
- [12] Mahajan S, Mittal N, Salgotra R, et al. An efficient adaptive SALP swarm algorithm using type II fuzzy entropy for multilevel thresholding image segmentation [J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022.
- [13] Ju Aiyun, Wang Zhongli. A novel fully convolutional network based on marker-controlled watershed segmentation algorithm for industrial soot robot target segmentation [J]. *Evolutionary Intelligence*, 2022, 16(3): 1–18.
- [14] Qiao Shuang, Yu Qinghan, Zhao Zhengwei, et al. Edge extraction method for medical images based on improved local binary pattern combined with edge-aware filtering [J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, 74: 103490.
- [15] Vera J F, Macías R. On the behaviour of K-means clustering of a dissimilarity matrix by means of full multidimensional scaling [J]. *Psychometrika*, 2021, 86(2): 489–513.
- [16] Sun Aiyun, Jia Wenbao, Hei Daqian, et al. Application of concave point matching algorithm in segmenting overlapping coal particles in X-ray images [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 171: 107096.
- [17] 肖乐意. Otsu 图像分割法的改进与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
Xiao Leyi. Improvement and application of Otsu image segmentation method [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [18] 刘杰, 安博文. 基于动态阈值分割的目标提取技术[J]. *红外技术*, 2008, 30(12): 706–708, 712.

- Liu Jie, An Bowen. Object extraction technique based on dynamic threshold segmentation [J]. Infrared Technology, 2008, 30(12): 706—708, 712.
- [19] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2007, 9(1): 62—66.
- [20] 李云红, 张秋铭, 周小计, 等. 基于形态学及区域合并的分水岭图像分割算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(2): 190—195.
- Li Yunhong, Zhang Qiuming, Zhou Xiaoji, et al. Watershed image segmentation algorithm based on morphology and region merging [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(2): 190—195.
- [21] 潘雄. 基于区域合并的图像分割算法研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- Pan Xiong. Research on image segmentation algorithm based on region merging [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [22] 陈斌斌, 范九伦, 雷博, 等. 基于 SLIC 超像素粒化的粗糙熵图像分割算法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 105—107.
- Chen Binbin, Fan Jiulun, Lei Bo, et al. SLIC superpixel granulation-based rough entropy image segmentation algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(2): 105—107.
- [23] Wang Yuting, Liao Zhouyu. A method for object extraction from crop image based on visual saliency [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2171(1): 012007.
- [24] 黄鹏, 郑淇, 梁超. 图像分割方法综述[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(6): 519—531.
- Huang Peng, Zheng Qi, Liang Chao. Overview of image segmentation methods [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2020, 66(6): 519—531.
- [25] 张轩, 张新峰. 粘连颗粒图像分割方法综述[J]. 图像与信号处理, 2018, 7(3): 113—118.
- Zhang Xuan, Zhang Xinfeng. Summarization of image segmentation methods for adhesive particles [J]. Journal of Image and Signal Processing, 2018, 7(3): 113—118.
- [26] 高辉, 甄彤, 李智慧. 粘连颗粒图像的分割方法综述[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 186—194.
- Gao Hui, Zhen Tong, Li Zhihui. A review of segmentation methods for adhesive particle images [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2022, 37(3): 186—194.
- [27] 韩明芮, 杨玺. 基于图像处理的包装缺陷检测方法综述[J]. 中国储运, 2019(9): 110—112.
- [28] 马佳佳, 王克强, 郑英雄, 等. 基于机器视觉的花生种子外观品质检测与分类方法研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(10): 225—227, 231.
- Ma Jiajia, Wang Keqiang, Zheng Yixiong, et al. Research on the appearance quality detection and classification of peanut seeds based on machine vision [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(10): 225—227, 231.
- [29] 王建宇. 基于卷积神经网络的玉米籽粒精选系统研制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- Wang Jianyu. Development of corn kernel sorting system based on convolutional neural network [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [30] 张博. 基于深度学习的小麦外观品质机器视觉检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Zhang Bo. Machine vision detection of wheat appearance quality based on deep learning [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [31] 祝保林. 基于机器视觉的小桐子种子识别分类研究[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- Zhu Baolin. Study on seed recognition and classification of Jatropha seed based on machine vision [D]. Kaifeng: Henan University, 2020.
- [32] 陈进, 顾琰, 练毅, 等. 基于机器视觉的水稻杂质及破碎籽粒在线识别方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 187—194.
- Chen Jin, Gu Yan, Lian Yi, et al. Online recognition method of impurities and broken paddy grains based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 187—194.
- [32] Xue Yong'an, Zhao Jinling, Zhang Mingmei. A watershed-segmentation-based improved algorithm for extracting cultivated land boundaries [J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 939.
- [34] Sun Quan, Zheng Junxing, Li Cheng. Improved watershed analysis for segmenting contacting particles of coarse granular soils in volumetric images [J]. Powder Technology, 2019, 356(C): 295—303.
- [35] Cao Wenxuan, Qiao Zeyu, Gao Zeyu, et al. Use of unmanned aerial vehicle imagery and a hybrid algorithm combining a watershed algorithm and adaptive threshold segmentation to extract wheat lodging [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2021, 123: 103016.
- [36] Gamarra M, Zurek E, Escalante H J, et al. Split and merge watershed: A two-step method for cell segmentation in fluorescence microscopy images [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2019, 53: 101575.
- [37] Zhao Min, Wu Wen Fu, Zhang Ya Qiu. The corn seed image segmentation and measurement of the geometrical features based on image analysis [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 1326(66—68): 1100—1105.
- [38] Kuang Fangjun, Xu Weihong, Wang Yanhua. Novel watershed algorithm for touching rice image segmentation [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1290(271—273): 1—6.
- [39] 蒋霓, 段凌凤, 杨万能, 等. 基于并行处理技术的谷物粒

- 型快速测量算法[J]. 光电工程, 2012, 39(3): 66—71.
- Jiang Ni, Duan Lingfeng, Yang Wanneng, et al. Fast grain shape determination algorithm based on parallel processing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(3): 66—71.
- [40] 李锦明. 基于机器视觉的玉米考种技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- Li Jinming. Research on maize seed examination technology based on machine vision [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.
- [41] 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 Xiaoting, Chen Jianghong, Chen Qingzhou. Image segmentation of soybean based on H-Dome [J]. Soybean Science, 2013, 32(6): 821—824.
- [42] Berggren M, Caiazza S, Chera M, et al. Kinematic edge detection using finite impulse response filters [J]. Nuclear Inst and Methods in Physics Research, 2021, 1010: 165555.
- [43] Xu Hongyun, Xu Xiaoli, Zuo Yunbo. Applying morphology to improve Canny operator's image segmentation method [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8816—8819.
- [44] 侯雨, 曹丽英, 丁小奇, 等. 基于边缘检测和 BP 神经网络的大豆杂草识别研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 185—190.
- Hou Yu, Cao Liying, Ding Xiaoqi, et al. Research on soybean weed recognition based on edge detection and BP neural network [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 185—190.
- [45] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274—2282.
- [46] Yadav D P. A method for human burn diagnosis using machine learning and SLIC superpixels based segmentation [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1116(1): 012186.
- [47] Shakir U, Naeem B, Muhammad Z. Adaptive tuning of SLIC parameter K [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(17): 25649—25672.
- [48] 郑金云. 基于聚类的超像素分割方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- Zheng Jinyun. Research on superpixel segmentation method based on clustering [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.
- [49] 何红霞. 基于机器视觉的小麦种子品种分类模型研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- He Hongxia. Research on wheat seed variety classification model based on machine vision [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [50] 李咏豪. 基于超像素的粘连谷粒分割算法[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(4): 110—112.
- Li Yonghao. Superpixel based adhesive grain kernel segmentation algorithm [J]. Digital Technology & Application, 2021, 39(4): 110—112.
- [51] 张宝全, 陆辉山, 王福杰, 等. 基于凹点分析法的粘连鸡体分割方法研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 164—170, 183.
- Zhang Baoquan, Lu Huishan, Wang Fujie, et al. Research on the segmentation method of adhesive chicken body based on concave point analysis [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 164—170, 183.
- [52] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 212—218.
- [53] 武威. 基于机器视觉技术的稻麦籽粒外观品质评测研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- Wu Wei. Evaluation of grain appearance quality of rice and wheat based on machine vision technology [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [54] 孙志恒. 基于深度学习的稻米垩白识别算法研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- Sun Zhiheng. Research and application of rice chalkiness recognition algorithm based on deep learning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [55] 刘宰豪. 基于凹点和重心检测的粘连类圆形目标图像分割[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- Liu Zaihao. Image segmentation of conglutination circular target based on concave point and center of gravity detection [D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [56] 樊蒙蒙. 基于 PCNN 和凹点的粘连大米图像分割[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- Fan Mengmeng. Image segmentation of bonded rice based on PCNN and concave point [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.
- [57] Lin P, Chen Y M, He Y, et al. A novel matching algorithm for splitting touching rice kernels based on contour curvature analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 124—133.
- [58] 布芳. 基于卷积神经网络的小目标检测与分割算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- Bu Fang. Research on small target detection and segmentation algorithm based on convolutional neural network [D]. Xi'an: Xidian University, 2019.