

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.025

玉米籽粒内部组分低对比度透射图像精确分割研究

王金星^{1,2} 李玉凤¹ 江浩¹ 张宏建¹ 张春庆³ 刘双喜^{1,4}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 山东农业大学农学院, 泰安 271018; 4. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要:为解决玉米籽粒透射图像由于对比度较低造成内部组分提取不精确的问题,提出一种基于色彩通道非线性变换的多通道重叠区域分割方法,对玉米籽粒图像在灰度、*R*通道及*b*通道下得到的二值图像使用重叠区域原理,实现玉米籽粒组分的精确分割。首先,采集不同玉米品种的籽粒透射图像,提取单粒玉米籽粒;其次,采用多通道重叠区域法分割单粒籽粒图像,得到玉米籽粒胚部、角质胚乳和粉质胚乳3部分的图像;最后,以查全率和查准率评价多通道重叠区域法与传统图像分割方法对不同品种玉米籽粒的分割效果。不同品种玉米籽粒的分割试验表明:多通道重叠区域分割方法的查全率、查准率及综合评价指标均达到98%以上,分割效果优于传统的图像分割方法,能够实现不同品种透明角质玉米籽粒透射图像的精确组分分割。

关键词: 玉米籽粒; 低对比度透射图像; 组分分割; 颜色空间变换; 多通道重叠区域

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0238-10 OSID: 

Accurate Segmentation of Low Contrast Transmission Images of Maize Grain Internal Components

WANG Jinxing^{1,2} LI Yufeng¹ JIANG Hao¹ ZHANG Hongjian¹ ZHANG Chunqing³ LIU Shuangxi^{1,4}
(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
3. College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
4. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: In order to solve the problem of inaccurate extraction of internal components in maize grain transmission image due to low contrast, a multi-channel overlapping region segmentation method based on non-linear transformation of color channel was proposed. The horny endosperm pixel information was obtained from the binary images of gray scale and *R* channel of maize; and the “farinaceous endosperm + embryo” image was transformed into Lab color space, the farinaceous endosperm image under *b* channel was extracted; and then the embryo pixel information was obtained from the binary images of *R* channel and *b* channel, so as to segment the components of maize grain accurately. Firstly, the transmission images of different maize varieties were collected, and the single grain was extracted. Secondly, the single maize grain images were segmented by the multi-channel overlapping region method based on the non-linear transformation of color channel, and the images of horny endosperm, farinaceous endosperm and embryo of maize grain were obtained. Finally, the recall ratio and the precision ratio were used to evaluate the segmentation effect of multi-channel overlapping region method and traditional image segmentation methods on different varieties of maize seeds. The experiments showed that the recall ratio, precision ratio and comprehensive evaluation index of the multi-channel overlapping region segmentation method were all over 98%. The segmentation effect was better than that of the traditional segmentation methods. It can realize the accurate segmentation of the transmission images of different varieties maize grain with transparent horny, and provide a scientific basis for the study of the three-dimensional distribution of internal components and the mechanism of dry crack formation in maize grains.

Key words: maize grain; low contrast transmission image; component segmentation; color space transform; multi-channel overlapping region

收稿日期: 2019-09-04 修回日期: 2019-12-28
基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR201709180195)、国家公益性行业农业科研专项(201303005)和“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)
作者简介: 王金星(1970—),男,教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jinxingw@163.com
通信作者: 刘双喜(1978—),男,副教授,主要从事计算机视觉研究,E-mail: shuangxiliu168@163.com

0 引言

玉米是世界上种植范围最广、总产量最高的经济作物,在我国农业生产和国民经济中占有重要地位^[1]。玉米籽粒由种皮、胚部和胚乳组成,胚乳部分又分为角质胚乳和粉质胚乳^[2-3]。玉米籽粒各组分的成分不同,导致籽粒内部密度差异以及受热表现不同,从而影响玉米干燥裂纹的形成^[4-5]。玉米籽粒图像分割可以获得角质胚乳、粉质胚乳及胚部的分布,为玉米籽粒内部组分立体结构分布和干燥裂纹形成机理的研究提供理论基础,对于干燥玉米品质控制及干燥参数选择具有指导意义。

玉米图像的分割主要集中于植株、粘连籽粒和病害等方面^[6-8],对单粒玉米籽粒图像内部组分的分割方法研究较少。胚乳的粉质部分与胚部色彩相近,对比度低,难以精确地进行分割提取。程洪等^[9]采用自动屏蔽0值像素的大津法和形态学运算对玉米籽粒图像进行分割,得到胚部区域。张俊雄等^[10]基于BP神经网络对遗传标记后的玉米单倍体种子图像进行分割。刘双喜等^[11]利用多段阈值分割方法对纵剖染色的玉米籽粒分割,得到玉米角质区和粉质区图像。国内外专家对于边缘模糊和低对比度图像的分割方法也进行了诸多研究^[12-14],SARABPREET等^[15]通过多尺度顶帽滤波器和h-最大值组合改善图像对比度,提出了一种曲线初始化水平集方法,提取接触细胞的细胞核和细胞边界。MOHAMMAD等^[16]改进了直方图分割技术,对图像进行归一化处理,避免图像增强过程中熵的损失。张铭钧等^[17]提出一种基于灰度化权值调整的水下彩色图像分割方法,通过改变各通道比例,增强灰度化后图像中目标与背景的对比度。陈本智等^[18]提出了一种新的无监督学习的焊缝区域检测算法,完成了焊缝区域的准确分割。

综合国内外研究发现,现有分割方法大多为单颜色空间下基于灰度变换和机器学习的改进算法,存在分割精度不高、需要大量训练等问题。为解决上述问题,本文提出一种基于色彩通道非线性变换的多通道重叠区域图像分割法,分割单粒玉米籽粒低对比度透射图像,以精确提取不同玉米品种籽粒各组分。

1 材料选择与图像采集

1.1 材料选择

选择山东农业大学黄淮海区域玉米技术创新中心提供的2018年黄淮海地区广泛种植的夏玉米——先玉335、郑单958、登海605、联创808、秋乐368和万

盛68^[19-21]作为试验材料,从每个玉米品种中选取200粒(共计1200粒)玉米籽粒作为研究样本。为获取玉米籽粒各组分,采集其透射图像进行研究。

1.2 图像采集装置

玉米籽粒透射图像采集装置主要由LED面光源、MV-DC-500型工业CCD相机、M3Z1228C-MP型成像镜头、相机支架以及装有图像采集软件的计算机构成,如图1所示。LED面光源的色温为6500K,使用时放置于玉米籽粒下方作为背景光源,以穿透籽粒观察其内部组分。工业CCD相机搭配成像镜头,技术参数如表1所示,通过计算机的图像采集软件实现对不同品种玉米籽粒透射图像的采集,透射图像如图2所示。

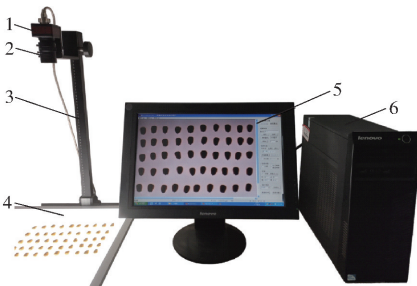


图1 玉米籽粒透射图像采集装置

Fig. 1 Maize grain transmission image acquisition device

1. 工业 CCD 相机 2. 成像镜头 3. 相机支架 4. LED 面光源
5. 图像采集软件 6. 计算机

表 1 技术参数

Tab.1 Technical parameters

装备名称	参数	数值/形式
MV-DC-500 型工业 CCD 相机	最高分辨率/(像素×像素)	2 592×1 944
	传感器类型	CMOS
	输出颜色	Bayer 彩色图像
	输出方式	USB2.0
	清晰度/线	1 500
	信噪比/dB	>52
M3Z1228C-MP 型成像镜头	动态范围/dB	60
	镜头接口	C 或者 CS 接口
	分辨率/像素	500 万
	焦距/mm	12~36
	成像尺寸/(mm×mm)	6.6×8.8(φ11)
	最大孔径比	1:2.8
	接口形式	C 接口



图2 玉米籽粒透射图像

Fig. 2 Maize grain transmission image

1.3 玉米籽粒单粒提取

试验中一次性采集多粒玉米籽粒,为便于统计运算,分析玉米籽粒的分割效果,需要对每个品种的玉米籽粒透射图像进行单粒提取。首先,对玉米籽粒透射图像进行灰度化处理,并通过单阈值($T_0 = 245$)分割的方式将单粒玉米籽粒与背景精确分开,得到二值图像。其次,使用目标轮廓查找函数,设定轮廓的面积范围,得到彼此独立的所有籽粒轮廓,并对其编号。最后,根据籽粒轮廓的最小外接矩形进行感兴趣区域提取,得到对应编号的单粒玉米籽粒透射图像,提取过程如图 3 所示。

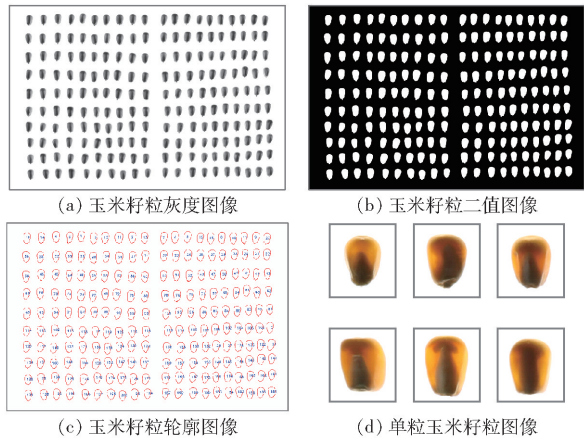


图 3 单粒玉米籽粒图像提取过程

Fig.3 Extraction process of single maize grain image

2 单粒玉米籽粒图像分割

阈值分割法作为一种基于区域的传统图像分割技术,是按照灰度级把像素点划分成不同区域^[22]。但从图 3 可以看出,单粒玉米籽粒透射图像对比度较低,在一些像素变化不明显的区域,仅靠改变阈值不能精确完成分割。因此,提出一种基于色彩通道非线性变换的多通道重叠区域法,以精确分割玉米籽粒透射图像。

2.1 多通道重叠区域法

多通道重叠区域法是将求解两图像重叠区域的问题等效为求解两个图像集合的交集。图 4 中图像 A、B 为像素值仅含 0 和 255 的二值图像,A 和 B 所有具有相同信息的像素点(坐标 (x,y) 及像素值都相同)构成的集合即为两个图像集合的交集,即上述提及的重叠区域。图中 $\times$ 表示两图像像素信息不同的像素点,构成的图像集合为非重叠区域。多通道重叠区域法要求两图像满足:两图像为尺寸相等的二值图像;两图像包含重叠区域;两图像的重叠区域或非重叠区域至少一个为目标图像。

通过对低对比度彩色图像进行多通道的阈值分割,可以获得包含重叠区域的二值图像 A、B,同时逐



图 4 重叠区域法原理图

Fig.4 Principle diagrams of overlapping region method

行扫描二值图像 A、B,比较两图像对应像素点的信息。若二者相应坐标 (x,y) 上的像素值相等,则提取重叠区域的信息(包括坐标及像素值),存入存储目标区域 I;若二者相应坐标点 (x,y) 上的像素值不相等,则提取非重叠区域的信息,存入存储目标区域 II;以此类推,直至图像扫描完毕,所有像素点构成的重叠区域、非重叠区域即目标区域 I、II 被完全找到并成功提取,流程图如图 5 所示。

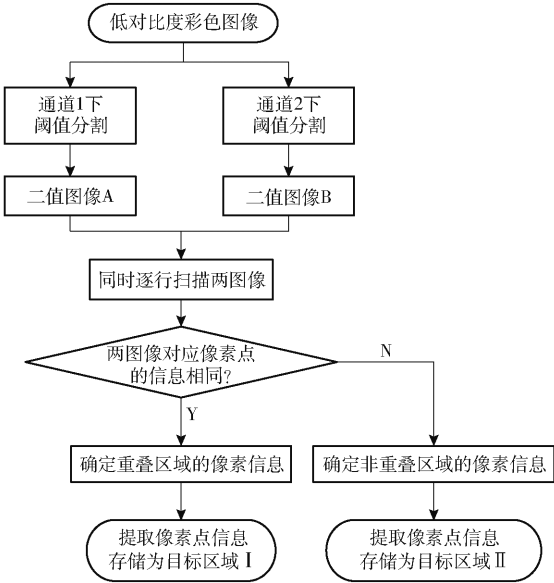


图 5 多通道重叠区域法流程图

Fig.5 Flow chart of multi-channel overlapping region method

2.2 角质胚乳分割

角质胚乳部分为黄色半透明状,在背景面光源的照射下呈现亮度较高的黄色,与粉质胚乳和胚部的颜色差别较为明显。根据上述多通道重叠区域法,提取玉米籽粒角质胚乳部分的图像。首先,对单粒玉米籽粒图像进行灰度化、二值化处理,获得图 6a 所示的籽粒整体二值图像;然后,将 RGB 图像进行通道分离,选择图 6b 角质胚乳亮度远高于粉质胚乳和胚部的 R 通道图像,根据双峰法^[23]进行单阈值分割获得图 6c 所示的粉质胚乳+胚部二值图像;最后,同时逐行扫描两二值图像,比较整体和粉质胚乳+胚部的二值图像像素信息,提取两者像素信息不同的非重叠区域存储为图 6d 所示的角质胚乳二值图像。根据图 6c、6d 二值图像中黑色区域的像素

点坐标,提取单粒玉米籽粒彩色图像对应的像素点信息,得到图 6e 所示粉质胚乳 + 胚部、图 6f 所示角质胚乳的彩色图像。

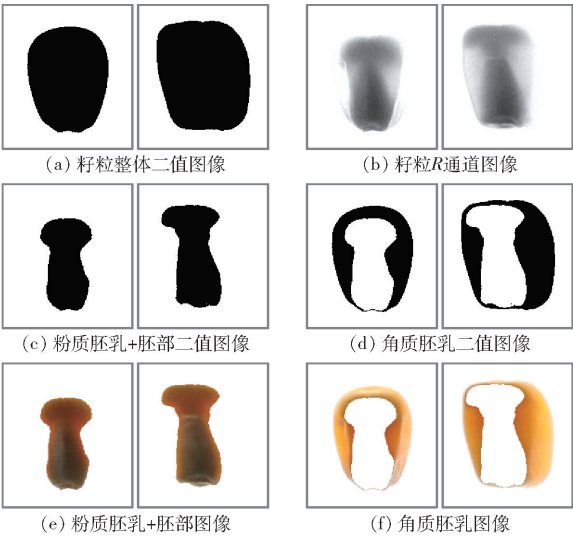


图 6 角质胚乳分割过程

Fig.6 Segmentation process of horny endosperm

2.3 粉质胚乳和胚部分割

从图 6e 可以看出,粉质胚乳 + 胚部图像的粉质胚乳与胚部颜色接近,灰度化得到图 7 所示的玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部灰度图像,并提取其灰度分布直方图。

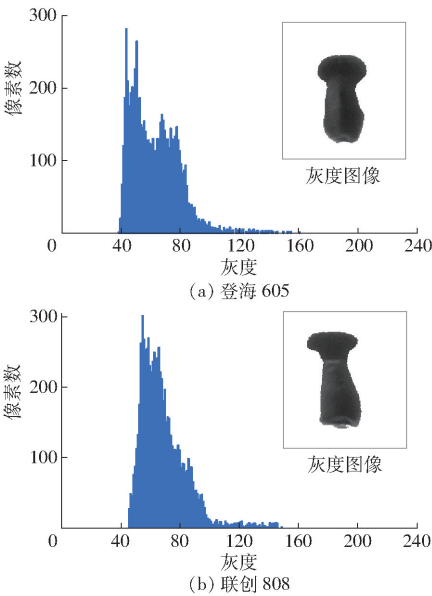


图 7 粉质胚乳 + 胚部灰度图像及其灰度分布

Fig.7 Gray image of farinaceous endosperm + embryo and its gray-scale distribution

由图 7 可见,粉质胚乳 + 胚部灰度图像的各灰度对应像素数无明显差异,即双峰谷底与峰顶距离太近,不存在明显双峰特性,甚至存在粉质胚乳与胚部灰度十分接近的单峰现象。若在灰度图像下分割,不可避免有部分目标提取不全甚至根本无法分

割的情况。RGB 空间中 3 个分量存在强相关性,胚部及粉质胚乳在 RGB 颜色空间下不易分割,因此需要找到能明显区分玉米籽粒粉质胚乳与胚部的颜色分量,且灰度差别越大越有利于玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部图像的分割。

Lab 颜色空间是由亮度 L 和色彩 a 、 b 3 个要素组成,Lab 颜色空间不仅可以消除颜色分量之间的强相关性,而且能够有效地将玉米籽粒图像的灰度信息与颜色信息分离开^[24],利于胚部及粉质胚乳的分割。自然采集环境下玉米籽粒透射图像的粉质胚乳部分为橙黄色,且恰好位于 b 分量的黄色到蓝色区间, b 通道下的粉质胚乳亮度较高,因此可以选择 b 通道来提取粉质胚乳区域。

要在 Lab 颜色空间的 b 通道下分割,就需要先进行色彩通道非线性变换,将 RGB 颜色空间转换为 Lab 颜色空间。为增加 b 通道下红色占比,提高粉质胚乳亮度,通过大量试验调整其转换矩阵参数,改变 Y 分量中 R 、 G 的比例,取 $Y = 0.712\ 671R + 0.215\ 160G + 0.072\ 169B$,以提高 b 通道图像的对比度。将 RGB 颜色空间转为 XYZ 空间,以及将 XYZ 空间转换为 Lab 颜色空间的转换公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412\ 453 & 0.357\ 580 & 0.180\ 423 \\ 0.712\ 671 & 0.215\ 160 & 0.072\ 169 \\ 0.019\ 334 & 0.119\ 193 & 0.950\ 227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 R 、 G 、 B ——RGB 颜色空间分量

X 、 Y 、 Z ——图像坐标值

$$L = 2.55(116f(Y/Y_n) - 16) \quad (2)$$

$$a = 500(f(X/X_n) - f(Y/Y_n)) + 128 \quad (3)$$

$$b = 200(f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)) + 128 \quad (4)$$

其中

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & (t > (\frac{6}{29})^3) \\ \frac{1}{3}(\frac{29}{6})^2 t + \frac{4}{29} & (t \leq (\frac{6}{29})^3) \end{cases} \quad (5)$$

$$X_n = 0.950\ 46 \quad Y_n = 1.0 \quad Z_n = 1.088\ 75$$

式中 X_n 、 Y_n 、 Z_n ——RGB 颜色空间到 XYZ 坐标空间转换矩阵系数

t ——空间坐标值与空间坐标转换矩阵系数的比值

L 、 a 、 b ——Lab 颜色空间分量

由此,得到图 8 所示的在 Lab 颜色空间下的玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部 b 通道图像,此时 Lab 颜色空间的 b 分量取值范围为 0 ~ 255,并提取其灰度分布直方图,图中 T 为阈值。

由图 8 可知,粉质胚乳 + 胚部 b 通道图像胚部与粉质胚乳呈现明显的双峰,图像对比度较高,胚部

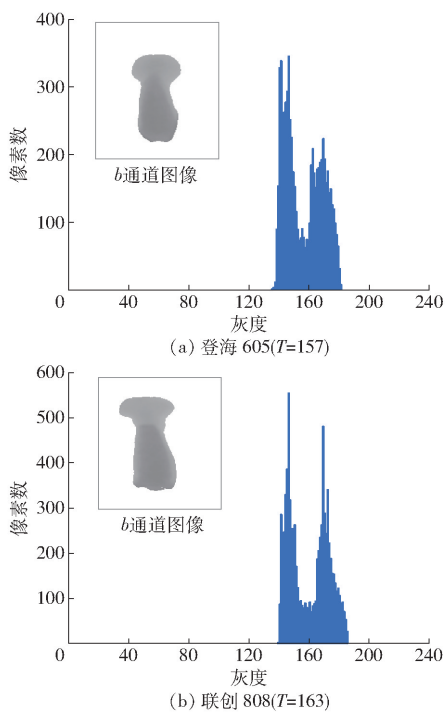


图8 粉质胚乳+胚部**b**通道图像及其灰度分布
Fig.8 *b* channel image of farinaceous endosperm + embryo and its gray-scale distribution

与粉质胚乳的区别更为明显。说明在**b**通道下能有效区分胚部目标和粉质胚乳目标。根据双峰法以两峰之间对应像素数最少处的谷底灰度作为阈值 T ，对粉质胚乳+胚部**b**通道图像进行阈值分割，得到图9a所示的粉质胚乳二值图像。然后，同时逐行扫描粉质胚乳+胚部和粉质胚乳的二值图像，比较二值图像像素信息，提取两者像素信息不同的非重叠区域存储为图9b所示的胚部二值图像。根据图9a、9b中黑色区域的像素点坐标，提取粉质胚乳+胚部彩色图像对应的像素点信息，得到粉质胚乳(图9c)、胚部(图9d)彩色图像。



图9 粉质胚乳和胚部分割过程

Fig.9 Segmentation process of farinaceous endosperm and embryo

2.4 玉米籽粒分割结果

首先在 R 通道下分割提取粉质胚乳+胚部图

像,通过多通道重叠区域法得到角质胚乳图像;再将粉质胚乳+胚部图像从 RGB 颜色空间转换到 Lab 颜色空间,在目标明显的 b 通道下分割提取粉质胚乳图像,并采用多通道重叠区域法得到胚部图像。为直观展现分割效果,依次提取角质胚乳、粉质胚乳以及胚部图像的非白色区域存储到新建的 RGB 图像数据集中,将3部分的分割结果融合为一幅彩色图像,如图10所示。其中,蓝色、红色及绿色区域分别为玉米籽粒的角质胚乳、粉质胚乳和胚部。

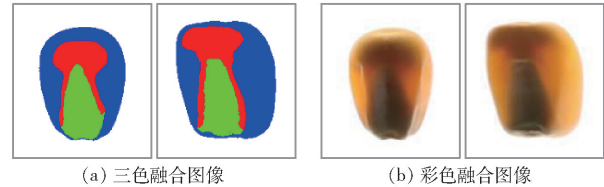


图10 3部分融合图像

Fig.10 Three-part fusion images

3 试验结果与分析

3.1 试验设计

为测试本文方法的精确性和适用性,以手动分割作为参考标准,对不同玉米品种籽粒图像进行不同分割方法对比试验^[25]。采集6个品种玉米籽粒低对比度透射图像,基于本文方法对不同玉米品种籽粒图像进行分割试验,开展固定阈值法、分水岭法、区域生长法和多阈值法等传统分割方法对不同玉米品种籽粒低对比度图像的分割试验,以对比分析本文方法在玉米籽粒图像分割中的性能优势。采集黄玉米、白玉米、白糯玉米、红糯玉米和黑糯玉米籽粒透射图像,基于本文方法对不同颜色玉米籽粒图像进行分割试验,测试本文方法的适用性。

3.2 试验分析

3.2.1 不同品种玉米籽粒组分分割

利用本文方法对6个品种(各200粒)玉米籽粒图像进行分割,不同玉米品种分割结果如图11所示。图11中从左到右依次为原图、角质胚乳图像、粉质胚乳图像、胚部图像、三色融合图像、彩色融合图像。

从图11可以看出,本文方法能够精确分割玉米籽粒低对比度图像,不同玉米品种籽粒的分割效果皆准确。为定量评价籽粒组分分割效果,引入全局查全率 G_r (Global recall ratio) 与全局查准率 G_p (Global precision ratio) 两项指标对分割效果进行评价^[26]。原始图像 I 分割成 N 个区域,其算法分割结果为 $M_{seg} = \{m_{seg}^1, m_{seg}^2, \dots, m_{seg}^N\}$, 参考分割图像为 $H_{seg} = \{h_{seg}^1, h_{seg}^2, \dots, h_{seg}^N\}$, 查全率 r 为算法分割所得

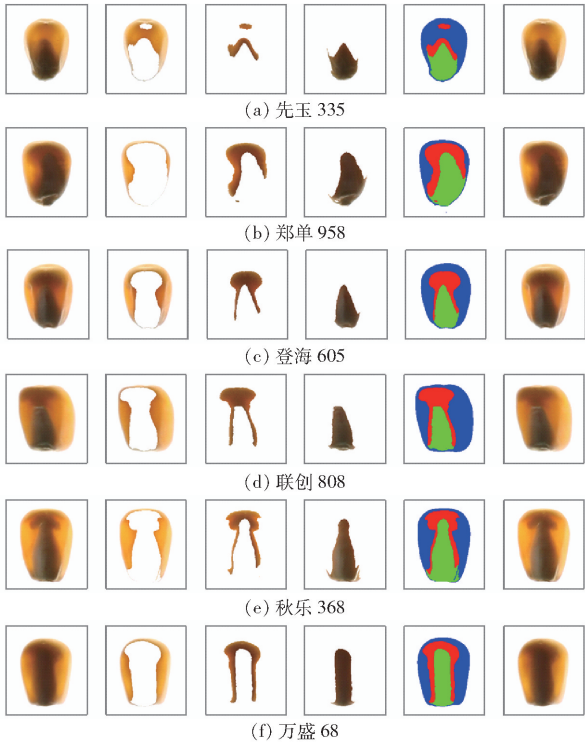


图 11 基于多通道重叠区域法的不同品种玉米籽粒图像分割结果

Fig. 11 Image segmentation results of different maize varieties by multi-channel overlapping region method

区域 m_{seg} 与其在参考分割图中匹配区域 h_{seg}^m 的重叠部分占区域 h_{seg}^m 的面积百分比。查准率 p 则为算法分割所得区域 m_{seg} 与其在参考分割图中的匹配区域 h_{seg}^m 的重叠部分占区域 m_{seg} 的面积百分比。查全率 r 、查准率 p 、全局查全率 G_r 与全局查准率 G_p 的计算公式为

$$r_i = \frac{|m_{seg}^i \cap h_{seg}^{m(i)}|}{|h_{seg}^{m(i)}|} \times 100\% \quad (6)$$

$$p_i = \frac{|m_{seg}^i \cap h_{seg}^{m(i)}|}{|m_{seg}^i|} \times 100\% \quad (7)$$

$$G_r = \sum_{i=1}^N w_i r_i \quad (8)$$

$$G_p = \sum_{i=1}^N w_i p_i \quad (9)$$

其中

式中 m_{seg}^i —— 算法分割所得的第 i 个区域
 $h_{seg}^{m(i)}$ —— 算法分割的第 i 个区域在参考分割图中的匹配区域
 r_i —— 第 i 个区域的查全率
 p_i —— 第 i 个区域的查准率
 w_i —— 加权系数

F1 为 r_p 的综合评价指标^[27], 计算公式为

$$F_1 = 2rp / (r + p) \quad (10)$$

式中 F_1 —— 综合评价指标

以手动分割结果作为参考分割图, 分别统计不同玉米品种 200 粒籽粒的角质胚乳、粉质胚乳与胚部区域各自查全率与查准率平均值以及籽粒全局查全率、全局查准率平均值, 结果如图 12 所示。

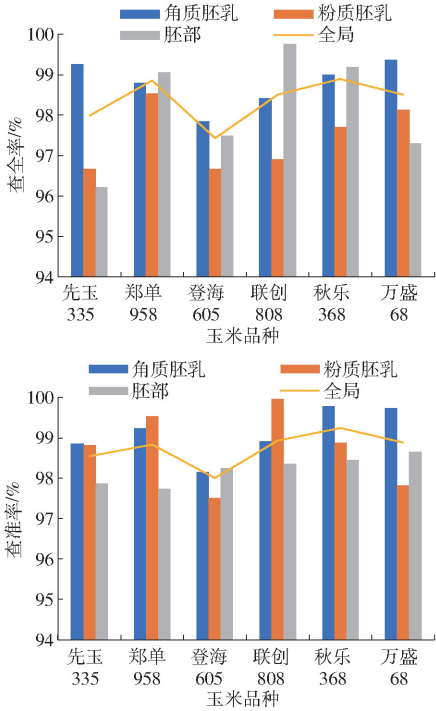


图 12 基于多通道重叠区域法的各玉米品种籽粒图像分割结果量化评价结果

Fig. 12 Quantitative evaluation results of image segmentation results by multi-channel overlapping region method

从图 12 中可以看出, 不同品种玉米籽粒的角质胚乳、粉质胚乳及胚部的查全率均不小于 96.22%, 查准率均不小于 97.51%。籽粒全局查全率与全局查准率约为 98%, 分割结果准确。分割方法适用范围广, 百粒玉米籽粒的分割效果稳定。本文方法对图 2 中 200 粒玉米籽粒透射图像的分割结果, 如图 13 所示。

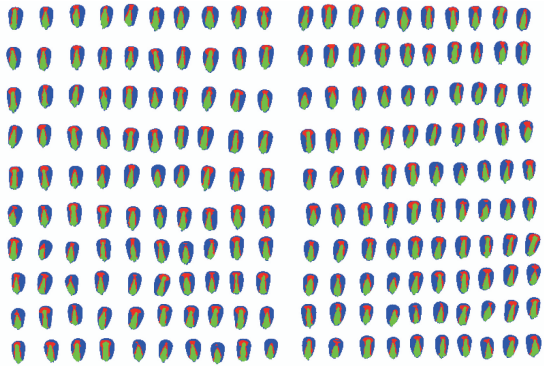


图 13 玉米籽粒透射图像分割结果

Fig. 13 Segmentation effect of maize grain transmission image

3.2.2 不同分割方法对玉米籽粒组分的分割效果
为进一步验证本文方法在玉米籽粒图像分割中

的优势,以手动分割结果为参照,分别利用固定阈值法、分水岭法、区域生长法、多阈值法和重叠区域法等不同分割方法对玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部低对比度图像进行分割,结果如图 14 所示。图 14 中从左到右依次为原图以及固定阈值法、分水岭法、区域生长法、多阈值法、本文方法、手动分割法处理结果。

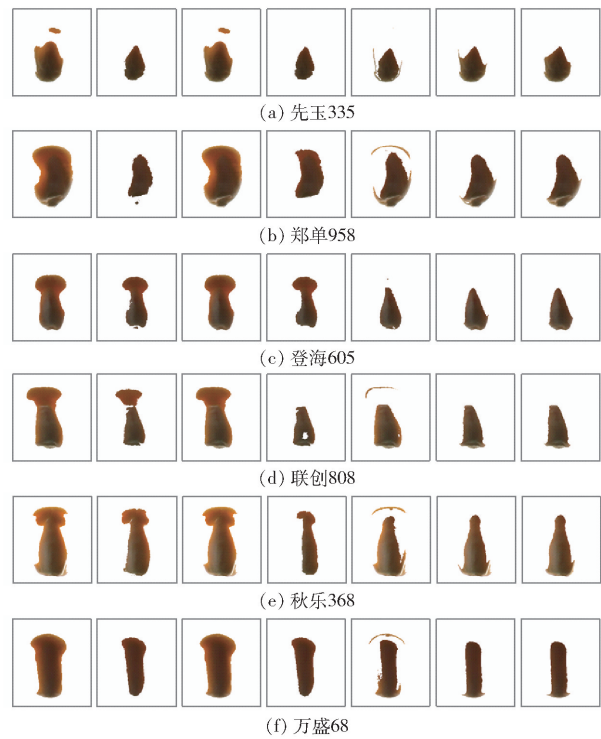


图 14 不同品种玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部图像经不同分割方法处理后的分割结果

Fig. 14 Segmentation results of farinaceous endosperm + embryo images of different maize varieties processed by different methods

从图 14 可以看出,粉质胚乳与胚部 RGB 色彩相近,固定阈值法分割彩色图像时,无论选用的阈值多大,粉质胚乳与胚部均有所粘连,无法实现对图像粉质胚乳和胚部的分割;分水岭法将粉质胚乳与胚部看作一体,能够与白色背景分开,但无法区分玉米籽粒的粉质胚乳和胚部;基于区域生长的分割方法分割效果与固定阈值法基本一致,粉质胚乳与胚部边缘无法区分,各玉米品种分割效果略有差异;多阈值法分割粉质胚乳 + 胚部图像时,虽然提取了部分胚部图像,但错误地识别了部分与胚部颜色相近的粉质胚乳区域,不能精确分割目标图像;本文方法分割得到的胚部图像与手动分割的结果相似度极高,能够精确分割玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部低对比度图像,不同品种玉米籽粒的分割效果均比传统分割方法准确。

为了对不同分割方法处理后的各玉米品种籽粒

粉质胚乳 + 胚部图像分割结果进行定量评价,分别统计了基于不同分割方法的胚部区域的查全率与查准率及其综合评价指标 F1,其平均值如表 2 所示。

表 2 基于不同分割方法的玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部图像分割结果量化评价

Tab. 2 Quantitative evaluation of segmentation results of farinaceous endosperm + embryo images processed by

参数	different methods					%
	固定 阈值法	分水 岭法	区域 生长法	多阈 值法	本文 方法	
查全率	79. 60	98. 55	74. 67	92. 96	98. 17	
查准率	78. 55	56. 05	81. 70	85. 57	98. 22	
F1	77. 55	71. 15	77. 10	88. 45	98. 19	

由表 2 可知,分水岭分割法查全率虽然最高,但分割结果包含非目标区域,且查准率较低;固定阈值法与区域生长法的 F1 值均在 77% 左右,分割效果相似;多阈值法在查准率与查全率上均有所提升,综合指标 F1 值达到 88. 45%,分割效果优于分水岭法、区域生长法及固定阈值法;本文方法的查全率、查准率与 F1 值均达到 98% 以上,分割效果最优。传统分割方法不能避免光照对图像分割质量的影响,对于低对比度的粉质胚乳与胚部不能精确区分,分割精度由低到高依次为分水岭法、区域生长法、固定阈值法、多阈值法、本文方法。

3. 2. 3 不同颜色玉米籽粒组分分割

为讨论本文方法对于不同颜色玉米籽粒透射图像分割的适应性,在相同光照强度、同样采集环境下,使用图 1 所示的透射图像采集装置采集黄玉米、白玉米、白糯玉米、红糯玉米和黑糯玉米籽粒透射图像,并利用本文方法对不同颜色玉米籽粒透射图像进行分割,结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出,本文方法对于黄玉米与白玉米籽粒透射图像内部组分的分割较精确,而对于白糯玉米、红糯玉米和黑糯玉米籽粒透射图像的分割效果较差。由于黄玉米与白玉米籽粒的角质透明,透光效果好,透射图像内部组分清楚,分割结果精确;而白糯玉米、红糯玉米和黑糯玉米为糯玉米(即蜡质玉米),籽粒胚乳呈角质不透明无光泽的蜡质状,透光效果差,导致籽粒分割难度变大,白糯玉米籽粒出现胚部分割不全、精度不高的问题,且红糯玉米和黑糯玉米自身颜色较深,影响透射图像采集效果,不能成功区分籽粒内部结构,分割效果最差;因此,透射图像分割方法适用于透光性良好的透明角质玉米籽粒组分分割,对于具有不透明蜡质的糯玉米并不适用。

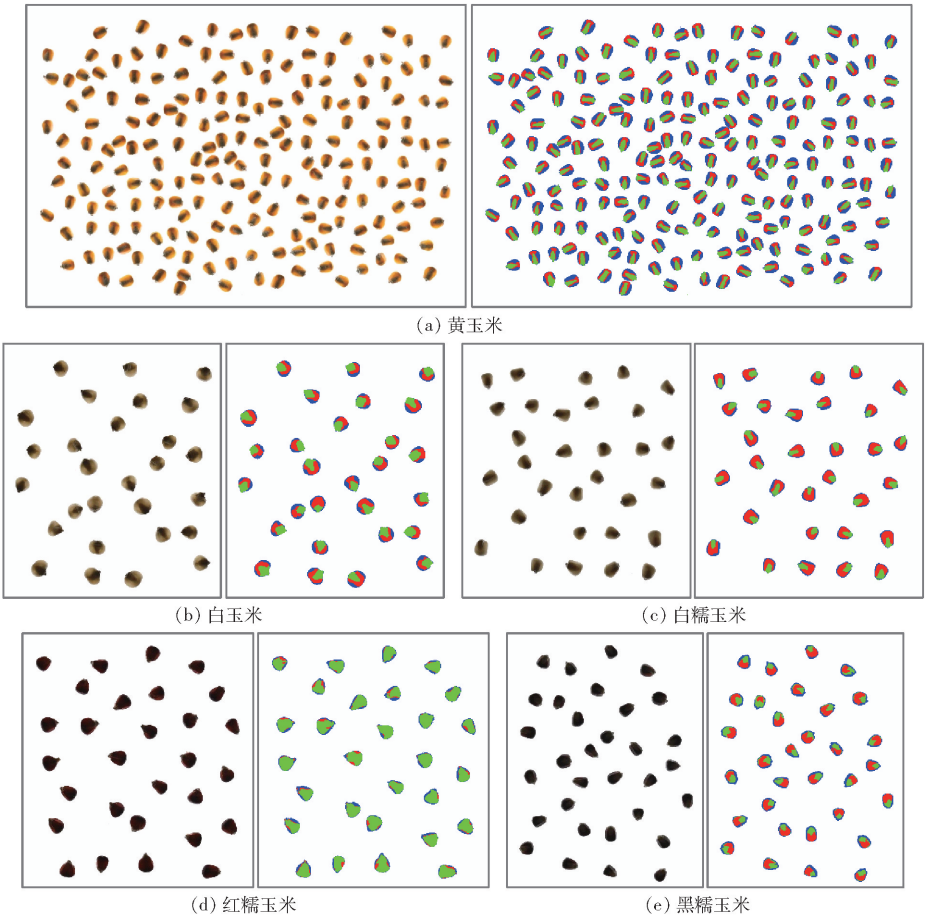


图 15 不同颜色玉米籽粒透射图像分割结果

Fig. 15 Segmentation results of different color maize grains transmission image

3.3 试验分析

本文方法对不同品种玉米籽粒图像分割试验表明,本文方法能够实现低对比度玉米籽粒图像的精确分割,能避免光照强度对图像分割质量的影响。且不同分割方法对不同品种的玉米籽粒粉质胚乳 + 胚部低对比度图像的分割效果表明,本文方法可以消除颜色分量之间的强相关性,分割效果优于传统分割方法,分割精度更高。不同颜色玉米籽粒图像分割试验表明,本文方法适用于透光性良好的透明角质玉米籽粒组分分割。

4 结论

(1)为实现对玉米籽粒低对比度透射图像的精确分割,提出了一种基于色彩通道非线性变换的多通道重叠区域分割方法。该方法将玉米籽粒图像从 RGB 颜色空间转换到 Lab 颜色空间,实现多颜色空

间多通道混用,降低对比度低对图像分割造成的影响,并利用多通道重叠区域法分割玉米籽粒透射图像,精确提取内部组分。

(2)采用本文方法和传统分割方法对玉米籽粒低对比度透射图像的分割效果进行比较,结果表明,本文方法分割结果的查全率、查准率与综合指标均达到 98% 以上,最接近手动分割结果,效果最优;虽然分水岭法、区域生长法、固定阈值法和多阈值法等传统分割方法的分割精度依次提升,但都不能精确区分玉米籽粒的粉质胚乳与胚部。

(3)本文方法能够避免光照对图像分割质量的影响,能够精确分割玉米籽粒组分,对不同品种透明角质玉米籽粒具有很强的适用性,有助于对玉米籽粒内部组分结构分布进行研究,为玉米的干燥处理提供指导。

参 考 文 献

[1] 赵久然,王帅,李明,等. 玉米育种行业创新现状与发展趋势[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(3):435 - 446.
ZHAO Jiuran, WANG Shuai, LI Ming, et al. Current status and perspective of maize breeding[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2018,19(3):435 - 446. (in Chinese)

[2] 史智兴,程洪,李江涛,等. 图像处理识别玉米品种的特征参数研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):193 - 195.
SHI Zhixing, CHENG Hong, LI Jiangtao, et al. Characteristic parameters to identify varieties of corn seeds by image processing

- [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 193–195. (in Chinese)
- [3] 伊祖涛, 张海艳. 玉米角质和粉质胚乳淀粉粒粒径、糊化特性及凝胶质构特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(7): 27–32.
YI Zutao, ZHANG Haiyan. Starch granule size, pasting properties and textural properties of horny endosperm and starchy endosperm in maize[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(7): 27–32. (in Chinese)
- [4] 刘军, 孔宁华, 张世伟, 等. 基于三维实体模型的玉米颗粒干燥过程中内部应力分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2015, 27(3): 177–184.
LIU Jun, KONG Ninghua, ZHANG Shiwei, et al. Internal stress analysis on drying process of corn kernel based on three dimension real body model[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2015, 27(3): 177–184. (in Chinese)
- [5] 张世伟, 孔宁华, 张志军, 等. 基于三维实体模型的玉米热风干燥模拟计算[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 871–874.
ZHANG Shiwei, KONG Ninghua, ZHANG Zhijun, et al. Simulation of hot air drying on corn grains based on the three dimension entity model[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(6): 871–874. (in Chinese)
- [6] 吴倩, 孙红, 李民赞, 等. 玉米作物多光谱图像精准分割与叶绿素诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 178–183.
WU Qian, SUN Hong, LI Minzan, et al. Research on maize multispectral image accurate segmentation and chlorophyll index estimation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1): 178–183. (in Chinese)
- [7] 杜建军, 郭新宇, 王传宇, 等. 基于分级阈值和多级筛分的玉米果穗穗粒分割方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 140–146.
DU Jianjun, GUO Xinyu, WANG Chuanyu, et al. Segmentation method for kernels of corn ear based on hierarchical threshold and multi-level screening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 140–146. (in Chinese)
- [8] 虎晓红, 李炳军, 刘芳. 多颜色空间中玉米叶部病害图像图论分割方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 177–181.
HU Xiaohong, LI Bingjun, LIU Fang. Image segmentation based on graph theory in multi-color space for maize leaf disease[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 177–181. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130233&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.033. (in Chinese)
- [9] 程洪, 史智兴, 尹辉娟, 等. 基于机器视觉的多个玉米籽粒胚部特征检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 145–151.
CHENG Hong, SHI Zhixing, YIN Huijuan, et al. Detection of multi-corn kernel embryos characteristic using machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 145–151. (in Chinese)
- [10] 张俊雄, 吴科斌, 宋鹏, 等. 基于 BP 神经网络的玉米单倍体种子图像分割[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 621–625.
ZHANG Junxiong, WU Kebin, SONG Peng, et al. Image segmentation of maize haploid seeds based on BP neural network[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(6): 621–625. (in Chinese)
- [11] 刘双喜, 傅生辉, 王金星, 等. 基于多阈值分割技术的玉米角质率定量测定方法研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 141–145.
LIU Shuangxi, FU Shenghui, WANG Jinxing, et al. Quantitative determination of maize endosperm vitreousness based on multi-threshold segmentation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(9): 141–145. (in Chinese)
- [12] 白翔志, 刘 Miaoming, 王 Tao, 等. 基于特征的多模糊推理系统用于低对比度红外船舶图像分割[J]. 应用软计算, 2016, 46: 128–142.
- [13] IDIR F, MALIKA B. Multi-scale contrast based skin lesion segmentation in digital images[J]. Optik, 2019, 185: 794–811.
- [14] 姬伟, 陶云, 赵德安, 等. 基于 CLAHE 的苹果树枝枝迭代阈值分割方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 69–75.
JI Wei, TAO Yun, ZHAO Dean, et al. Iterative threshold segmentation of apple branch images based on CLAHE[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 69–75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140411&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.011. (in Chinese)
- [15] SARABPREET K, SAHAMI J S. Curvelet initialized level set cell segmentation for touching cells in low contrast images[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2016, 49: 46–57.
- [16] MOHAMMAD F, MOHAMMAD K. Information preserving histogram segmentation of low contrast images using fuzzy measures[J]. Optik, 2018, 157: 1397–1404.
- [17] 张铭钧, 李焯, 王玉甲. 基于灰度化权值调整的水下彩色图像分割[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(5): 707–713.
ZHANG Mingjun, LI Xuan, WANG Yujia. Underwater color image segmentation based on weight adjustment for color-to-gray[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(5): 707–713. (in Chinese)
- [18] 陈本智, 方志宏, 夏勇, 等. 厚钢管 X 射线图像中焊缝区域的检测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 131–138.
CHEN Benzhi, FANG Zhihong, XIA Yong, et al. Detection of weld regions in X-ray images of thick steel pipes[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(4): 131–138. (in Chinese)
- [19] 李少昆, 王克如, 杨利华, 等. 河北夏播区玉米机械粒收质量及影响因素研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 120–128.
LI Shaokun, WANG Keru, YANG Lihua, et al. Study on the influencing factors of quality of kernels in maize mechanical kernel harvest as well as cultivar selection in Hebei Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(2): 120–128. (in Chinese)
- [20] 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 131–138.
DANG Hongkai, LI Wei, CAO Caiyun, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 131–138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140511&flag=1&journal_id=jcsam

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140521&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 05. 021. (in Chinese)
- [21] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱动辅助种气吸式精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):61–70. SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):61–70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190507&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 05. 007. (in Chinese)
- [22] 韩瑞珍. 基于机器视觉的农田害虫快速检测与识别研究[D]. 杭州:浙江大学,2014. HAN Ruizhen. Research on fast detection and identification of field pests based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [23] 许永华,吴敏,何勇,等. 一种基于经验知识和信息熵的阈值选择策略[J]. 化工学报,2008,59(7):1803–1807. XU Yonghua, WU Min, HE Yong, et al. A threshold selection strategy based on empirical knowledge and information entropy[J]. CIESC Journal, 2008, 59(7):1803–1807. (in Chinese)
- [24] 刘慧,刘加林,沈跃,等. 植株点云超体聚类分割方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):172–179. LIU Hui, LIU Jialin, SHEN Yue, et al. Segmentation method of supervoxel clusterings and salient map[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):172–179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181222&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 12. 022. (in Chinese)
- [25] 程玉柱,陈勇,张浩. 基于MMC与CV模型的苗期玉米图像分割算法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):266–270. CHENG Yuzhu, CHEN Yong, ZHANG Hao. Color image segmentation algorithm of corn based on MMC and CV model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):266–270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20131145&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 11. 045. (in Chinese)
- [26] 刘春燕. 图像分割评价方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011. LIU Chunyan. Survey on evaluation methods of image segmentation algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [27] 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 CSAE, 2018, 34(13):187–194. (in Chinese)

(上接第 228 页)

- [22] RUSSELL B C, TORRALBA A, MURPHY K P, et al. LabelMe: a database and web-based tool for image annotation[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 77(1–3):157–173.
- [23] LONG J, SHELHAMER E, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2014, 39(4):640–651.
- [24] RAHMAN M A, WANG Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation[M]//Advances in visual computing. Springer International Publishing, 2016.
- [25] NEUBECK A, GOOL L V. Efficient non-maximum suppression[C]//International Conference on Pattern Recognition, 2006.
- [26] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440–1448.
- [27] REN S, GIRSHICK R, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6):1137–1149.
- [28] DAI J, LI Y, HE K, et al. R-FCN: object detection via region-based fully convolutional networks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, 2016: 379–387.
- [29] NGUYEN T D, SHINYA A, HARADA T, et al. Segmentation mask refinement using image transformations[J]. IEEE Access, 2017, 5:26409–26418.
- [30] TRULLO D, PETITJEAN S, RUAN S, et al. Segmentation of organs at risk in thoracic ct images using a sharpmask architecture and conditional random fields[C]//Proc. IEEE Int. Symp. Biomed. Imaging, 2017:1003–1006.
- [31] 姜红花,刘理民,柳平增,等. 面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):120–129. JIANG Honghua, LIU Limin, LIU Pingzeng, et al. Online calculation method of fruit trees canopy volume for precision spray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):120–129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190712&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 07. 012. (in Chinese)
- [32] 袁会珠,王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015, 41(6):15–22. YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Journal of Plant Protection, 2015, 41(6):15–22. (in Chinese)