

基于改进的快速最大熵多阈值的成熟草莓图像分割

阮松¹, 孙开琼³, 覃磊^{1,2*}, 张文质¹, 周康¹

(1. 武汉轻工大学数学与计算机学院, 武汉 430023; 2. 华中科技大学自动化学院, 武汉 430074; 3. 南昌航空大学测试与光电工程学院, 南昌 330063)

摘要: 成熟草莓图像分割是草莓机械化采摘中首要解决的难题之一, 最大熵多阈值算法是图像分割中效果较稳定的方法之一, 但存在计算复杂度高、分割速度慢等缺点。为降低算法的计算复杂度、加快搜索速度, 提出了一种改进的快速最大熵多阈值图像分割算法(IFMEMT)。首先提取 RGB 彩色图像的 R 分量灰度图像及灰度图像信息, 然后应用 IFMEMT 算法求得最大熵及对应的阈值, 最后进行图像分割。实验结果表明, 在复杂环境下 IFMEMT 相对 OTSU 等图像分割算法不仅能达到相同甚至更好的分割效果, 而且有更好的分割效率, 能满足成熟草莓机械化采摘的实时性要求。

关键词: 图像分割; 快速; 最大熵; 多阈值

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2016)01-0107-06

Ripe Strawberry Image Segmentation Based on Improved Fast Maximum Entropy Multiple Threshold

RUAN Song¹, SUN Kaiqiong³, QIN Lei^{1,2*}, ZHANG Wenzhi¹, ZHOU Kang¹

(1. School of Mathematics and Computer, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023; 2. School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 3. School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Aeronautics University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Ripe strawberry image segmentation is one of the primary problems of strawberry mechanization picking. Maximum entropy multiple threshold algorithm is one of the stability threshold methods in the image segmentation field, but it has the shortcomings of high computational complexity and slow segmentation speed and so on. To reduce its computational complexity and accelerate its search speed, an improved fast maximum entropy multiple threshold strawberry image segmentation method (IFMEMT) was proposed in the paper. Firstly, the R component gray images of RGB color images and their gray image information were extracted, and then applied IFMEMT algorithm, the maximum entropy and their corresponding thresholds were obtained; finally, the images were segmented. The experimental results showed that IFMEMT in a variety of complex environments could not only achieve the same or even better segmentation effect than OTSU algorithm, but also had better segmentation efficiency, and it could meet the real-time requirement of ripe strawberry mechanization picking.

Key words: Image segmentation; Fast; Maximum entropy; Multiple threshold

自上世纪 80 年代以来, 随着改革开放和农村经济体制改革的发展, 各级政府及科研单位对草

莓生产的重视, 使草莓生产迅速发展。草莓以其周期短、见效快、经济效益高、适于保护地栽培等优势而成为中国果树业中发展最快的一项新兴产业, 有的地区草莓种植业还成为当地农村经济的支柱产业。据不完全统计, 20 世纪 80 年代我国草莓栽培面积大约为 3300 hm²; 到 2001 年栽培面积达 60 000 hm², 超过美国而居世界各国之首, 已经成为草莓生产大国。2007 年生产草莓 130 万 t, 居世界第一位, 年草莓出口量约 5 万 t。露地栽培一般亩产 500 ~ 1500 kg, 保护地栽培一般亩产 1000

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61163046); 湖北省教育厅科技计划项目(B20091803); 武汉轻工大学科研计划项目(2015y03); 武汉轻工大学校立大学生科研项目(xsky2015032)

作者简介: 阮松(1994-), 男, 在读本科, 主要从事图像处理与智能计算研究。

通讯作者: 覃磊, 男, 在读博士, 副教授, E-mail: 53039943@qq.com

~ 2000 kg。随着草莓产量的不断增加,草莓成熟后必须及时采摘。目前草莓的采摘方式主要为人工采摘,但草莓的日成熟量大,采摘时间紧迫,草莓采摘工作量的繁重已成为草莓种植业发展的瓶颈,如何实现草莓的机械化采摘对于减轻草莓采摘工作量,加快草莓业的种植与发展具有重要意义。机械化采摘核心环节之一是成熟草莓的图像分割,成熟草莓图像分割效率直接影响后续的机械化采摘。

图像分割领域已出现很多算法^[1-6],但有关草莓图像分割的研究开展不久,如张铁中等选取 3×3 邻域像素的 H 通道值作为草莓图像的特征,借助 Photoshop 分割后的图像作为教师信号,应用 BP 神经网络较好地实现成熟草莓果实与背景的分,但需要 Photoshop 的手工操作,另外 BP 神经网络的训练也需要大量时间代价^[7]。Guo Feng 等利用 OHTA 颜色空间图像分割算法提取草莓图像,但其应用背景并非草莓种植园的复杂环境^[8]。谢志勇等根据 CIE-XYZ 颜色模型及其色调度,提出了一种在 RGB 彩色模型中进行草莓图像色调分割的方法,但实验描述对象过于简单^[9]。周天娟等在基于数学形态学的方法上,研究相接触草莓的聚类快速分割法和分水岭区域分割法,仿真结果显示这两种算法都能将相接触区域分开,但其针对的对象仅为有粘连的草莓图像^[10]。王雪光等在 Lab 彩色模式下将 K 均值聚类用于成熟草莓图像的分割,研究表明算法能较好分割出成熟草莓图像,但聚类中心选取有待商榷^[11]。

上述文献在处理草莓图像分割存在诸多缺陷,最大熵图像分割法是由 Pun 等提出的利用最大先验熵估计分类合理性来选择阈值的方法,对不同目标大小和信噪比的图像都能产生较好的分割效果,但在确定多阈值时往往计算复杂性很大,难以满足实时要求^[12-3]。近来已有学者试图通过模拟退火算法、粒子群等策略寻找多阈值,但模拟退火算法收敛速度慢,执行时间长,粒子群、鱼群算法稳定性差,参数选择需依靠主观经验^[12-15]。陈露晨等提出了一种快速最大熵多阈值图像分割算法(FMEMT),通过递推省掉了重复计算的变量,预先计算后存入二维表,使计算复杂度大大减少^[16]。本文在文献[16]的基础上,更改搜索参数并将二维表进一步改进,提出了一种基于改进的快速最大熵多阈值的成熟草莓图像分割算法(IFMEMT)。实验结果表明,IFMEMT 算法相对 OTSU 等图像分割算法在复杂环境下不仅能达到

相同甚至更好的分割效果,而且大大加快了分割速度。

1 最大熵图像分割

1.1 最大熵单阈值图像分割

假设一幅灰度图像有 N_0 个像素, L 个灰度级, $\{1, 2, \dots, L\}$ 表示图像的灰度值集合, n_i 表示灰度值 i 的像素个数, 则灰度值 i 的概率为 $p_i = n_i/N_0$, 给定一个阈值 T , 将图像灰度分为目标和背景两个区域, 则两类的平均相对熵 $E_1 = -\sum_{i=0}^T \frac{p_i}{P_T} \ln \frac{p_i}{P_T}$, $E_2 = -\sum_{i=T+1}^{L-1} \frac{p_i}{1-P_T} \ln \frac{p_i}{1-P_T}$, 其中 $P_T = \sum_{i=0}^T p_i$, 则图像的熵为 $E = E_1 + E_2$, 若记 $H_{L-1} = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln p_i$, $H_T = -\sum_{i=0}^T p_i \ln p_i$, 则图像的熵可化简为 $E = \ln P_T + \ln(1 - P_T) + \frac{H_T}{P_T} + \frac{H_{L-1} - H_T}{1 - P_T}$, 最佳阈值即为求 $T = \arg \max_{1 \leq T \leq L} (E)$ 。

1.2 最大熵多阈值图像分割

给定 K 个阈值 t_1, t_2, \dots, t_k , 将图像分为 $K + 1$ 个区域, 区域的灰度值分别为 $\{1, 2, \dots, t_1\}$, $\{t_1 + 1, t_1 + 2, \dots, t_2\}$, \dots , $\{t_k + 1, t_k + 2, \dots, L\}$, 令 $t_0 = 1, t_{k+1} = L$, 记 $w_k = \sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i$, $k = 1, 2, \dots, K + 1$, 则各区域的熵可表示为

$$H_k = -\sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} \frac{p_i}{w_k} \ln \frac{p_i}{w_k} = \ln w_k - \frac{1}{w_k} \sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i \ln p_i \tag{1}$$

所以图像的熵为

$$E = \sum_{k=1}^{K+1} H_k = \sum_{k=1}^{K+1} (\ln w_k - \frac{1}{w_k} \sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i \ln p_i) \tag{2}$$

最佳阈值即为求

$$(T_1, T_2, \dots, T_K) = \arg \max_{1 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k \leq L} (E) \tag{3}$$

1.3 快速最大熵多阈值图像分割算法

定义 $P(i, j) = \sum_{k=i}^j p_k, j \geq i$,

$Q(i, j) = \sum_{k=1}^j p_k \ln p_k, j \geq i$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, L$, 令 $P(1, 0) = 0, Q(1, 0) = 0$, 显然

$$P(1, j + 1) = \sum_{k=1}^{j+1} p_k = \sum_{k=1}^j p_k + p_{j+1} = P(1, j) + p_{j+1} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
Q(1, j + 1) &= \sum_{k=1}^{j+1} p_k \ln p_k \\
&= \sum_{k=1}^j p_k \ln p_k + p_{j+1} \ln p_{j+1} \quad \dots\dots\dots(5) \\
&= Q(1, j) + p_{j+1} \ln p_{j+1}
\end{aligned}$$

则

$$p(i, j) = p(1, j) - p(1, i - 1) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$Q(i, j) = Q(1, j) - Q(1, j - 1) \quad \dots\dots\dots(7)$$

所以

$$w_k = \sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i = p(t_{k-1} + 1, t_k) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i \ln p_i = Q(t_{k-1} + 1, t_k) \quad \dots\dots\dots(9)$$

由式(8)、(9)得,计算图像的熵式(2)需计算出 $P(t_{k-1} + 1)$ 和 $Q(t_{k-1} + 1, t_k)$, 而 $1 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k \leq L$, 可先用式(4)-(7)建立 P 和 Q 的二维表,然后由式(8)、(9)查表求出满足式(2)、(3)的最大熵对应的阈值。

2 改进的快速最大熵多阈值算法

2.1 二维表的改进

FMEMT 虽然首先建立了 $P(i, j)$ 和 $Q(i, j)$ 的二维表,计算时可先通过查表将 w_k 和 $\sum_{i=t_{k-1}+1}^{t_k} p_i \ln p_i$ 找到,然后代入式(2),遍历 $1 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k \leq L$ 的所有参数求出满足式(3)的最优阈值,但式(2)中需反复的取对数,反复的求商,这些都给 FMEMT 算法带来重复且繁杂的计算代价,本文在二维表 P 和 Q 的基础上,将其合并升级为新的二维表,合并避免了 FMEMT 在计算式(2)时出现的重复繁杂计算,仅需要遍历查表求最大值即可,后续的实验过程也验证这个改进大大加快了分割速度,具体过程如下。由式(2)、(8)和(9)得

$$\begin{aligned}
E &= \sum_{k=1}^{K+1} H_k = \sum_{k=1}^{K+1} \left(\ln P(t_{k-1} + 1, t_k) - \frac{Q(t_{k-1} + 1, t_k)}{P(t_{k-1} + 1, t_k)} \right) \\
&= \sum_{k=1}^{K+1} R(t_{k-1} + 1, t) \\
&\dots\dots\dots(10)
\end{aligned}$$

其中记

$$R(i, j) = \ln P(i, j) - \frac{Q(i, j)}{P(i, j)} \quad \dots\dots\dots(11)$$

则二维表

$$R = \begin{bmatrix} R(1, 1) & R(1, 2) & \dots & R(1, L) \\ & R(2, 2) & \dots & R(2, L) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & R(L, L) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(12)$$

所以可在求出二维表 P 和 Q 的基础上,应用式(11)求出二维表 R ,遍历 t_1, t_2, \dots, t_k 所有参数求出满足式(10)的最大值对应阈值即可。

2.2 遍历起止参数的确定

FMEMT 需遍历 $1 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k \leq L$ 的所有参数,限制在 $[1, L]$ 的原因是因为图像的灰度值默认为 $\{1, 2, \dots, L\}$, 而每一幅图像往往最小灰度值并不是 1,可能会大于 1,最大灰度值并不是 L ,可能会小于 L ,所以本文在处理图像前,首先搜索图像的最小和最大灰度值,分别记为 *minimum gray value* 和 *maximum gray value*, 所以搜索时仅需遍历 $\text{minimum gray value} \leq t_1 < t_2 < \dots < t_k \leq \text{maximum gray value}$ 的参数即可,这个改进避免了 FMEMT 的无效阈值搜索,提高了搜索速度。

3 基于改进的快速最大熵多阈值的成熟草莓图像分割

3.1 彩色图像的灰度化

因为处理的对象是 RGB 模式的彩色图像,而 OTSU、最大熵等算法适用于灰度图像的阈值分割,所以首先将 RGB 模式的彩色图像转化为灰度图像,考虑到彩色图像中主要对象为成熟草莓、未熟青绿色草莓、绿色草莓叶子和黑色地膜,成熟草莓图像红色分量对比背景物体应有更强的区分度,更有利于各算法的分割,所以仅提取彩色图像的 R 分量作为灰度图像进行各算法的图像分割。

3.2 成熟草莓图像分割的 IFMEMT 算法步骤

(1)彩色图像的灰度化和图像特征提取

提取各彩色图像的 R 分量作为灰度图像,统计灰度图像的直方图及每个灰度的概率,确定图像灰度的起止参数 *minimum gray value* 和 *maximum gray value*。

(2)二维表 R 的建立

利用式(4)~(7)建立二维表 P 和 Q , 利用式(11)建立二维表 R 。

(3)遍历搜索最大熵及阈值

遍历 $[\text{minimum gray value}, \text{maximum gray value}]$ 范围内所有整数,查表 R 由式(10)求出最大熵及其阈值。

(4)成熟草莓图像分割

由所得阈值对灰度图像进行分割。

4 实验结果与分析

为验证 IFMEMT 算法,在 Intel(R) Pentium(R)

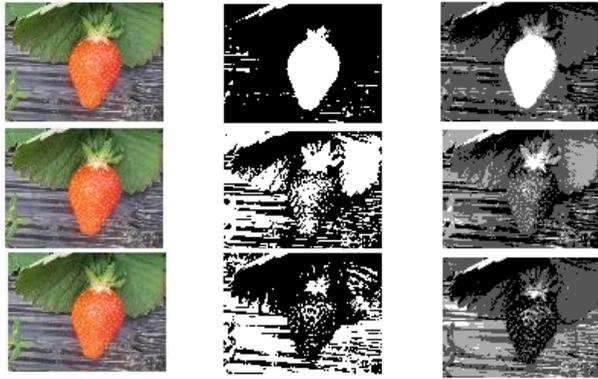


图1 RGB三分量灰度图分割结果

CPU B950 @2.10GHz, 4.00GB RAM 的环境下,采用 matlab 7.0 在多幅图像上用文献[1~4]和[16]中的

OTSU、最大熵单阈值、基于全局搜索的最大熵多阈值图像分割算法(GSMEMT)、FMEMT和本文的IFMEMT算法进行了图像分割实验,GSMEMT、FMEMT和IFMEMT的阈值数设为3。实验图像为2015年1月11日采集于湖北省武汉市东西湖区银柏路东湖大队草莓园农场,每幅图像为360×480像素。

4.1 RGB灰度图像分割效果比较与分析

首先对RGB彩色图像的R、G、B三个灰度图像的分割效果进行实验,选取一幅图像,分别通过它的R、G、B分量灰度图像进行图像分割,实验结果见图1,其中从左至右分别为原图、OTSU、GSMEMT算法分割后的图像,从上到下图像分别为原图通过R、G、B分量灰度图像进行图像分割。

从图1的各行比较易得出,彩色图像的R分量灰度图像的分割效果远好于其他两个分量的灰度图像,验证了3.1的彩色图像灰度化选择R分量

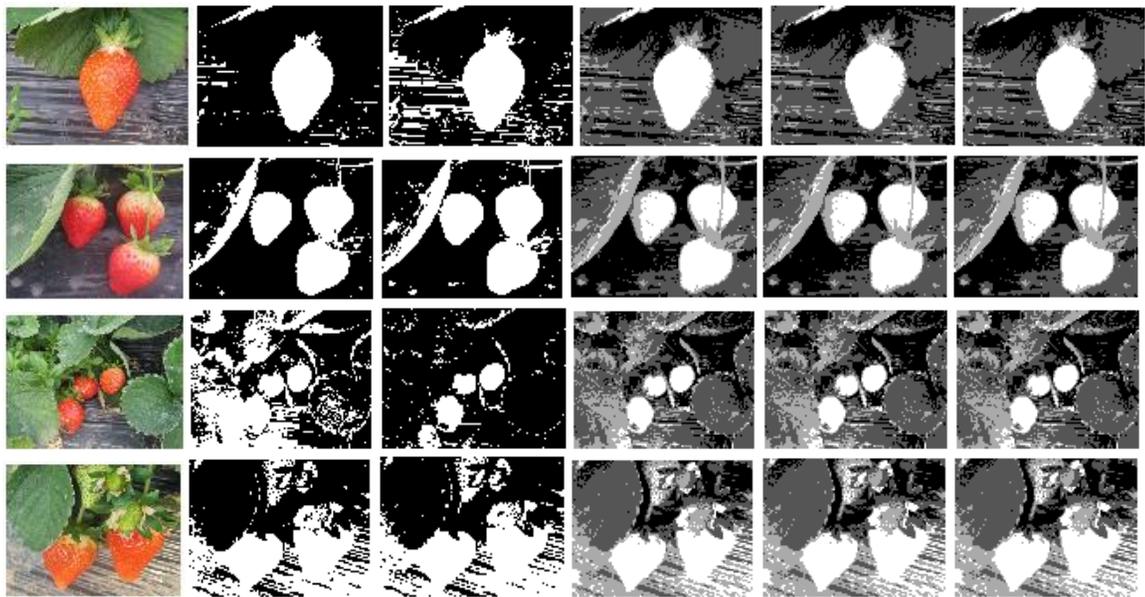


图2 四种不同情况的分割结果

灰度化后分割效果更好的设想。

4.2 单、多阈值分割效果比较与分析

选取四幅图像为例对比 OTSU、最大熵单阈值、GSMEMT、FMEMT 和 IFMEMT 五种算法的分割效果,如图2所示,其中从左至右分别为原图、OTSU、最大熵单阈值、GSMEMT、FMEMT 和 IFMEMT 分割后的图像,从上至下分别为一个草莓图像、有粘连多个草莓图像、有粘连及疤痕多个草莓图像、有未成熟草莓的多个草莓图像分割效果图。

图2代表草莓图像的四种不同环境,对于独立的单个草莓,所有算法基本都能正确分割,但

最大熵单阈值算法对于黑色地膜纹理的处理并不理想,出现很多水平条纹;对于有粘连的多个草莓图像,虽然 OTSU 和最大熵单阈值算法将草莓正确分割,但同时长片绿色叶子边缘区域也错分为草莓图像,而GSMEMT、FMEMT和IFMEMT能对草莓正确分割;对于有粘连及疤痕多个草莓图像,OTSU是四种算法中分割效果最差的,草莓、地膜,叶子大块区域混淆,最大熵单阈值算法稍好一些,但对于绿色叶子边缘处理效果较差,同时将左下角区域的枯叶误分割为草莓区域,而GSMEMT、FMEMT和IFMEMT能对草莓正确分割;对于有未成熟草莓的多个草莓图像,虽然 OTSU

和最大熵单阈值算法将草莓正确分割,但同时将青绿色的未成熟草莓也错分为成熟草莓图像,而

且对地膜纹理的处理效果也不好,GSMEMT、FMEMT和IFMEMT算法除少许遮挡,基本能对成

表1 三种算法的分割效率比较

图像	阈值	最大熵	GSMEMT平均运行时间(s)	FMEMT平均运行时间(s)	IFMEMT平均运行时间(s)
1	90, 153, 211	15.32	35.21	17.46	1.71
2	88, 138, 196	15.83	28.07	14.29	1.31
3	72, 132, 183	16.10	34.96	19.25	1.71
4	72, 131, 192	16.27	37.25	17.59	1.58

熟草莓正确分割。

五种算法中OTSU和最大熵单阈值算法分割效果相似,容易受到叶子边缘、地膜纹理、未成熟草莓、枯叶等诸多背景的干扰,GSMEMT、FMEMT和IFMEMT比OTSU和最大熵单阈值算法的分割效果要好,受上述诸多背景的干扰要小,同时GSMEMT、FMEMT和IFMEMT算法由于选取的阈值相同,所以分割效果也相同。为进一步比较这三种算法的分割效率,将三种算法各运行20次,实验结果见表1。

由表1,IFMEMT可以达到GSMEMT和FMEMT算法同样的分割效果,即可得到相同的阈值和熵,所有图像的重复实验IFMEMT每次都能求得图像的最大熵及其阈值,体现了IFMEMT的稳定性。而且四幅图像IFMEMT每次实验平均耗时仅为GSMEMT的4.86%、4.67%、4.89%和4.24%,耗时均不到GSMEMT的5%,对比FMEMT,IFMEMT每次实验平均耗时也仅为FMEMT的9.79%、9.17%、8.88%和8.98%,耗时均不到FMEMT的10%,达到同样分割效果IFMEMT时间代价远低于GSMEMT和FMEMT。IFMEMT分割效率远超出GSMEMT、FMEMT的原因在于:第一,由于三种算法都是基于最大熵多阈值分割原理下搜索最优阈值,所以会得到相同的分割结果,图2和表1也体现了这一结论。第二,三种算法中,GSMEMT是在整个整数空间中搜索,遍历中每次迭代都得通过式(2)求熵,式(2)巨大且重复地计算需要耗费大量的时间和空间代价,这严重影响了算法性能。对于快速最大熵多阈值图像分割算法FMEMT,虽然文献[16]通过递推构造二维表P和Q,通过查表省掉了式(2)中 W_k 和 $\sum_{i=l_{k-1}+1}^{l_k} P_i \ln P_i$ 的重复计算,但计算熵式(2)时仍需重复地取对数,重复地计算商、差,这些使得虽然FMEMT的计算效率相对于GSMEMT有一些改善,但还有很大的提升空间。IF-

MEMT正是基于这个缺陷,继续推导式(2),得到二维表R,熵值的计算仅需通过查表R然后进行加法即可,无需其他繁杂运算。同时,遍历起止灰度值参数的确定并未如GSMEMT、FMEMT做整个整数空间的搜索,因为空白灰度值的阈值搜索实质为无效搜索,针对每幅图像通过搜索图像的最小和最大灰度值作为起止参数,有效避免空白灰度值的无效搜索,所有这些大大提高了算法的运行效率,所以IFMEMT分割效率远远超出GSMEMT、FMEMT算法。

5 结 论

本文提出了一种针对成熟草莓图像分割的改进的快速最大熵多阈值算法,IFMEMT图像分割算法能有效处理各种复杂环境下的成熟草莓图像分割,能有效区分叶子边缘、地膜纹理、未成熟草莓、枯叶等诸多背景的图像,分割效果超出OTSU、最大熵单阈值算法。同时,对比同为最大熵多阈值的GSMEMT、FMEMT算法,IFMEMT不仅能达到同样的分割效果,而且耗时远小于GSMEMT和FMEMT,能满足成熟草莓机械化采摘的实时性要求。

参考文献:

- [1] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [2] Pun T. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Signal Process, 1980, 2(3): 223-237.
- [3] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method of gray level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29(2): 273-285.
- [4] 张俊娜,冯云芝.基于量子最大熵多阈值算法的图像分割研究[J].激光与红外,2013,43(5):578-582.
- [5] 闫磊,刘芷宁,林剑辉,等.一种粘连谷物图像分割及杂质识别算法开发[J].吉林农业科学,2012,37(4):72-76.
- [6] 王献锋,王震,王旭启,等.基于SVM和形态学的作物病

- 斑图像分割方法[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(1): 51-53.
- [7] 张铁中, 周天娟. 草莓采摘机器人的研究: I. 基于BP神经网络的草莓图像分割[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(4): 65-68.
- [8] Guo F, Cao Q X, Nagata M. Fruit Detachment and Classification Method for Strawberry Harvesting Robot [J], International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(1): 41-48.
- [9] 谢志勇, 张铁中. 基于RGB彩色模型的草莓图像色调分割算法[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 84-86.
- [10] 周天娟, 张铁中, 杨 丽, 等. 基于数学形态学的相接触草莓果实的分割方法及比较研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 164-168.
- [11] 王雪光, 陈淑红. 基于K均值聚类的成熟草莓图像分割算法[J]. 农机化研究, 2013(6): 51-54.
- [12] 赵于前, 李慧芬, 王小芳. 基于模拟退火算法的多阈值图像

(上接第 85 页)

- [19] 郎印海, 蒋 新, 赵其国, 等. 磺酰脲除草剂在土壤中的环境行为研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1178-1190.
- [20] 何 进, 唐明明, 潘思竹, 等. 粉唑醇在土壤中的降解因素研究[J]. 广州化工, 2015(4): 121-123.
- [21] 欧晓明, 张 俐, 裴 晖, 等. 新农药硫脲醚在土壤中的降解[J]. 中国环境科学, 2005(6): 705-709.
- [22] 李彦文. 恶唑菌酮残留分析方法及其在土壤中的转归研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005.
- [23] 毛应明. 有机磷农药在土壤中的降解转化过程及影响因子研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [24] 马恩忠. 正丁基-2-吡啶基醚的水解反应[J]. 天津化工, 2004, 18(2): 34-35.
- [25] Huang X, He J, Sun J Q, et al. Isolation and characterization of a metsulfuron-methyl degrading bacterium *Methylophila* sp. S113 [J]. International Biodeterioration Biodegradation, 2007, 60(3): 152-158.
- [26] 战徊旭, 任洪雷, 蒋凌雪, 等. 氟磺胺草醚降解菌的分离鉴定及生长特性研究[J]. 作物杂志, 2011(2): 40-44.
- [27] Guo J, Zhu G, Shi J, et al. Adsorption, desorption and mobility of Fomesafen in Chinese soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 2003(148): 77-85.

(责任编辑: 范杰英)

(上接第 106 页) 2002, 17(3): 239-242.

- [2] Rinaudo M. Chitin and chitosan: properties and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2006(31): 603-632.
- [3] 蒋挺大. 甲壳素[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 2-3.
- [4] 李 丽, 杨雪松, 刘红全. 微生物几丁质酶的特性及其应用的研究进展[J]. 广西民族大学学报, 2011, 17(1): 92-96.
- [5] 薛惠琴, 孙国荣, 杭怡琼. 浅谈虾仁生产废弃物的开发利用[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2009(2): 105.
- [6] 闫文慧, 王 兵, 楼康怡, 等. 转几丁质酶基因烟草对三种真菌拮抗作用的研究[J]. 西南师范大学学报, 2014(10): 71-75.
- [7] 郭玉莲. 微生物几丁质酶及其在植物病害防治中的作用[J]. 中国农学通报. 2005, 21(1): 283-285.
- [8] Dan J L, Jones D G. Plant pathogen sand integrated defense responses to infection[J]. Nature, 2001(411): 826-833.
- [9] SB Yan, Minamie. Oligosaccharide signaling for defense responses in plant[J]. Physiol. Mol. Plant Patho, 2001(59): 223-233.
- [10] 沈小洁, 陈晓艺, 陈 放, 等. 寡糖作为生物农药在微生物病害防治中的作用机理[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(10): 5159-5162.
- [11] 韦相贤, 成儒萍. 50%醚菌酯水分散粒剂防止黄瓜白粉病药效研究[J]. 现代农业科技, 2010(17): 175-180.
- [12] 张圣平, 刘苗苗, 苗 晗, 等. 黄瓜白粉病抗性基因的QTL定位[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3584-3593.

(责任编辑: 王 昱)