

## 基于 G-MRF 模型的玉米叶斑病害图像的分割

赖军臣<sup>1</sup>, 汤秀娟<sup>3</sup>, 谢瑞芝<sup>2</sup>, 白中英<sup>3</sup>, 李少昆<sup>1, 2</sup>

(<sup>1</sup>石河子大学, 新疆石河子 832000; <sup>2</sup>中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程, 北京 100081;

<sup>3</sup>北京邮电大学, 北京 100876)

**摘要:** 【目的】图像分割是作物病害自动识别系统实现的难点之一, 前人研究大多采用基于阈值或聚类的分割算法, 方法简单、易于实现, 但分割精度较低。本文引入高斯模型的 Markov 随机场分割模型 (G-MRF), 对玉米叶部病斑图像进行分割试验, 以期提高分割精度。【方法】在 VC6.0 下实现了 G-MRF 分割模型, G-MRF 既利用了图像像素的灰度信息, 又通过像素类别标记的 Gibbs 光滑先验概率引入了图像的空间信息, 是能较好地分割含有噪声图像的算法。采用该算法对大斑病、小斑病、灰斑病和弯孢菌叶斑病等 4 种主要玉米叶部病害的图像进行了分割测试, 并与基于阈值和基于 Gauss 模型的分割算法进行比较。【结果】基于 G-MRF 分割模型的分割, 目标区域的一致性和边缘的清晰方面明显好于基于阈值和 Gauss 模型的分割算法, 其平均正确分类率达 96.35%, 分别较基于阈值和基于 Gauss 模型的分割算法高出 3.75% 和 4.03%, 差异达到显著水平。【结论】基于 G-MRF 模型的分割算法鲁棒性高, 能够有效地将病斑区域从叶片部分离, 分割正确分类率达 96.35%, 可用于玉米叶斑类病害图像的分割。

**关键词:** Gauss; Markov; 玉米叶部病斑; 图像分割

## Maize Leaf Disease Spots Segmentation Based on Gauss-MRF Model

LAI Jun-chen<sup>1</sup>, TANG Xiu-juan<sup>3</sup>, XIE Rui-zhi<sup>2</sup>, BAI Zhong-ying<sup>3</sup>, LI Shao-kun<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang; <sup>2</sup>Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facilities for Crop Genetic Resources and Improvement, Beijing 100081; <sup>3</sup>Beijing Posts and Telecommunications University, Beijing 100876)

**Abstract:** 【Objective】 Image segmentation is one of the difficult issues in crop disease automatic identification systems, in present research, algorithms based on threshold or based on clustering were mostly used. These methods are simple and easy of implementation, but the precision is low. In order to improve the segmentation precision of maize disease spots, Gauss-MRF model was introduced to segment maize disease spot images. 【Method】 The algorithm was implemented on VC6.0. Gauss-Markov random field model takes advantage of both image intensity and spatial information imposed by Gibbs smoothness prior about the pixel labels and thus can be used to effectively segment the noised images. Four kinds of corn disease images were segmented, and segmentation results were compared with algorithms based on threshold and Gauss model. 【Result】 The segmentation algorithm based on G-MRF model showed higher precision, and the segmentation results showed accurate and closed boundaries. The mean correct classification ratio of G-MRF model was up to 96.35% which was higher than algorithms based on threshold and Gauss model, respectively, by 3.75% and 4.03%. 【Conclusion】 The research shows that the segmentation algorithm based on G-MRF model is satisfactory to separate disease part from normal part of leaves. The mean correct classification ratio is 96.35%. It is effective in segmenting and processing maize disease spots images.

**Key words:** Gauss; Markov; maize disease spots; segmentation

收稿日期: 2009-09-02; 接受日期: 2010-01-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 项目 (2007AA10Z237, 2006AA10Z207, 2006AA10A302)

作者简介: 赖军臣, 博士研究生。E-mail: ljc-hm@163.com。通信作者李少昆, 研究员, 博士。Tel: 010-82108891; E-mail: lishk@mail.caas.net.cn

## 0 引言

【研究意义】随着计算机软硬件性能的提高以及机器视觉技术的进步,利用计算机视觉实现作物病害的自动化识别已成为精准农业新的发展方向<sup>[1-2]</sup>。机器视觉技术在农业中的研究起步较晚,其中实现高效高精度的分割算法是实现自动识别的热点研究问题<sup>[3-6]</sup>。

【前人研究进展】早在 1989 年,穗波信雄等利用计算机视觉技术分别对缺乏钙、铁、镁营养元素的茨菇叶片进行了露天图像采样,以阈值法分割出的叶片上病态部分和正常部分的面积比作为特征,研究茨菇缺素症<sup>[7]</sup>;陈佳娟等用基于阈值的分割算法实现了棉花与背景的分隔<sup>[8]</sup>;林晓燕等用基于阈值的算法分割杨树病害孢子<sup>[9]</sup>;毛罕平等尝试用聚类分割算法识别农作物病害图像<sup>[10]</sup>;岑喆鑫用 EM 算法对黄瓜病斑图像进行了分割<sup>[11]</sup>。【本研究切入点】针对作物病斑图像分割,前人研究较多采用基于阈值和阈值与聚类相结合的分割算法,由于作物病害图像叶片和病斑区域颜色本身就不均匀,灰阶范围常常出现重叠,且边界具有模糊性,用像阈值这种固定标准的分割方法,分割误差是不可避免的。基于 G-MRF 模型的分割算法近年来在很多领域都得到了广泛关注,G-MRF 模型由于既利用了像素的灰度信息,又通过像素类别标记(PL)集的 Gibbs 光滑先验概率引入空间信息,能较好的分割噪声图像。但是这种算法尚未见应用于作物病害图像分割领域。【拟解决的关键问题】本文结合玉米病斑图像的特点,实现基于 G-MRF 模型的分割算法,对玉米病斑图像进行分割,以提高病斑图像分割的精度。

## 1 材料与方 法

### 1.1 图像获取

2008 年 6 月至 9 月分别在北京、四川、河南、云南等地,在大田开放环境条件下采集玉米感病品种大斑、小斑、灰斑、弯孢叶斑、褐斑、普通锈病 6 种最为常见的玉米叶斑病典型症状病害图像样本各 120 余幅。所用数码相机为佳能 G9 (分辨率 1 200×1 600) 专业 DC 和索尼 a700 单反相机(分辨率 3 104×2 064),镜头: Sony F2.8/50 mm 微距镜头。拍摄图像时,相机设置为手动调节焦距和光圈,自动白平衡,关闭闪光灯,采取遮阴避免阳光直接照射和避开刮风、降雨天气拍摄病叶图像。图 1 所示为玉米灰斑病图像样本。为获取清晰的病害图像和方便拍摄,拍摄前裁剪玉米

发病部位叶片(不含主叶脉),并将一张 A4 白纸置于病叶下方,作为图像背景以消除大田中其它复杂背景的影响;在病叶旁放置一已知尺寸的蓝色硬纸卡,作为参照。



图 1 玉米叶部病害原始图像示例

Fig. 1 Original image of maize leaf disease

### 1.2 图像预处理

病害图像以 BMP 格式导入计算机,录入玉米叶部病害图像数据库。从 6 种叶斑病中随机选取大斑病、小斑病、灰斑病、弯孢菌叶斑病 4 种病害各 30 幅图像作为预处理样本。预处理样本经锐化和中值滤波图像增强后,人工裁去背景,剪裁成大小为 480×320 的病叶图像用以分割测试。

### 1.3 算法介绍

1.3.1 基于 G-MRF 模型分割算法原理 在 RGB 颜色空间,采用 R 分量分割预处理后的图像。设  $L = \{1, 2, \dots, l\}$ ,  $S = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $D = \{1, 2, \dots, d\}$ 。L 为像素类别标记(PL)集,  $l$  表示第  $l$  类;  $S$  为有  $N$  个像素点的图像像素集;  $D$  为像素的灰度集。图像分割即为对图像上每一像素分配一个 PL 集中的变量  $l$ 。分割结果为:

$$Y = \{y = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_N) \mid y_i \in L, i \in S\}$$

图像的灰度信息表示为:

$$X = \{x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_N) \mid x_i \in D, i \in S\}$$

设分割得到的 PL 集  $Y$  是定义在  $S$  上的 MRF 随机场,  $S$  上的一点  $i$  的邻域为:  $N_i, i \notin N_i$ , 若  $j \in N_i \Leftrightarrow i \in N_j$ ,  $M = \{N_i, i \in S\}$  是  $S$  的邻域系统。其中  $N_i$  是与  $i$  相邻的位置集合,  $\forall l \in L, i \in S$ :

$$p = (y_i = l \mid y_{N_i}) = p(l), \text{ 而此模型认为 } Y \text{ 是 MRF}$$

的一个实现<sup>[12]</sup>，则：

$$p(y) = \frac{1}{Z} \exp(-U(y)) \quad Z = \sum_{y \in Y} \exp(-U(y))$$

则化常量，叫做分裂函数。其中， $U(y) = \sum_{c \in C} V_c(y)$  在

本文只考虑一阶八邻域系统，因此：

$$U(y) = \sum_{i \in S} V_1(y_i)$$

$$\text{令 } V_1(y_i) \text{ 为： } V_1(y_i) = \begin{cases} -\beta & (y_i = y_{N_i}) \\ \beta & (\text{其它}) \end{cases}$$

对于一阶八邻域系统  $N_i$  包含与像素  $i$  相邻的 8 个像素点。 $\beta$  是邻域对不同 PL 的惩罚因子，用于控制分割的光滑  $\beta$  程度，本文令为定值 1。 $\beta$  值可根据情况改变，可以为某一定值，也可以将其设为变值<sup>[13]</sup>。

设图像每一类  $l$  中的像素符合  $\theta_l = \{u_l, \sigma_l\}$  的 Gauss 分布，则

$$p(x_i | y_i) = g(x_i; \theta_l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left(-\frac{(x_i - u_l)^2}{2\sigma_l^2}\right)$$

其中， $x_i$  为图像中某一像素的灰度。

对于已知混合成分参数矢量  $\theta = (\theta_1 \dots \theta_L)$ ，其中  $\theta_l = (u_l, \sigma_l^2)$ ，Gauss 混合分布的密度函数为：

$$p(x_i, \theta) = \sum_{l=1}^L \delta_l p_l(x_i, \theta_l)$$

其中， $\delta_l$  为混合系数，表示各混合成分的先验概率。

将 Gauss 混合模型的线性混合系数  $\delta_l$  (混合成分的先验概率) 用以某一像素的邻域系统为 Markov 随机场的概率代替，公式表示为：

$$p(x_i | y_{N_i}, \theta) = \sum_{l \in L} g(x_i; \theta_l) p(l | y_{N_i}) \quad (1)$$

图像的标号 (分割结果) 就是在所有可能的分割  $Y$  中找到使后验能量最小的  $y$ ，即：

$$\hat{y} = \arg \min_{y \in Y} \{U(f | y) + U(y)\} \quad (2)$$

### 1.3.2 基于 G-MRF 模型的分割算法步骤

①初始化聚类数目  $L$  (只区别目标和背景  $L=2$ )；

②以 K-means 算法做初始分割，得到各类初始均值和方差及初始分割结果：

$$(u_1, \sigma_1^2; \dots; u_L, \sigma_L^2), Y^0;$$

③E 步：分别计算  $U(y)$  和  $U(x|y)$ ，其中，

$$U(f | y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(f_i - u_{y_i})^2}{2\sigma_{y_i}^2} + \log(\sigma_{y_i}) \right]$$

$$U(y) = \sum_{i \in S} v_1(y_i)$$

计算  $U_{old} = U(x|y) + U(y)$

根据公式 (1)，分别求出每个像素点  $x_i$  属于某

一类别的概率，属于哪一类别的概率最大，则将  $y_i$  更新为这一类别的标号；

④M 步：更新  $u_l, \sigma_l^2$ ；

⑤计算  $U_{new} = U(x|y) + U(y)$ ，当  $|\frac{U_{new} - U_{old}}{U_{old}}| < 0.1\%$

时，终止迭代；否则继续迭代 E 步和 M 步，直到满足终止条件。

### 1.4 算法评价方法

从预处理后的图像中随机选取大斑、小斑、灰斑、弯孢菌叶斑病图像各 15 张，用 Photoshop 对图片进行手工分割，得到符合人视觉习惯的标准分割作为对照

(图 2 为 G-MRF 分割算法和 Photoshop 人工标准分割结果)，分别用基于 G-MRF 模型的分割算法、基于阈值和基于 Gauss 模型的分割算法分割，并用正确分类率 (CCR) 比较分割精度，CCR 定义如下<sup>[15]</sup>：

$$CCR = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \frac{|GT_j \cap Seg_j|}{|GT_j|} \times 100\% \quad (3)$$

其中， $GT_j$  表示第  $j$  类的标准分割， $Seg_j$  表示第  $j$  类的实际分割结果， $L$  表示分割总类数。正确分类率表示的是实际分割与标准分割的接近程度，正确分类率越高表示分割结果的面积越接近标准分割结果的面积。

图像处理和操作的操作系统为 Windows XP，图像预处理、分割算法及评价算法以 VC6.0 作为开发平台编程实现。

## 2 结果

### 2.1 G-MRF 模型对 4 种玉米病斑的分割

图 3—图 6 分别为大斑病、小斑病、灰斑病及弯孢菌叶斑病的原始图像及基于 G-MRF 模型的分割算法的图像分割结果，该算法对不同纹理的叶片背景不敏感，能够很好地将病斑区域分割出来，分割结果有很好的区域一致性且边缘较平滑，基本能够适应大田自然条件拍摄的病斑图像。

### 2.2 基于 G-MRF 模型的分割算法与阈值算法、Gauss 模型分割算法效果比较

2.2.1 简单背景条件下的分割效果比较 图 7-A 是色彩较均匀、叶片和病斑区域的灰度级范围重叠较少、背景相对简单的玉米大斑病的原始图像，图 7-B、C、

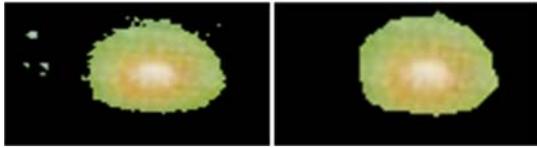


图 2 G-MRF 分割算法 (左) 及 Photoshop 人工标准分割结果 (右)

Fig. 2 The contrast of segmentation result between G-MRF (left) and Photoshop (right)

D 分别为基于阈值算法、基于 Gauss 模型和基于 G-MRF 模型的分割结果。由结果图可以看出, 基于阈值和基于 Gauss 模型的分割算法也能有效地分割出病斑区域, 虽然存在部分误分点, 但与基于 G-MRF 模型的分割效果差别不明显。

2.2.2 复杂背景条件下的分割效果比较 图 8-A 是是色彩不均匀、叶片衰老变黄和病斑区域的灰度级范围相互重叠、背景相对复杂的玉米灰斑病的原始图像, 图 8-B、C、D 分别为基于阈值算法、基于 Gauss 模型



图 3 玉米大斑病及 G-MRF 分割结果

Fig. 3 Northern leaf blight of corn and the segmentation result by G-MRF

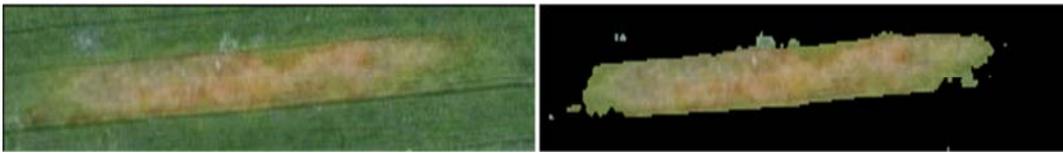


图 4 玉米灰斑病及分割结果

Fig. 4 Grey leaf spot of corn and the segmentation result by G-MRF

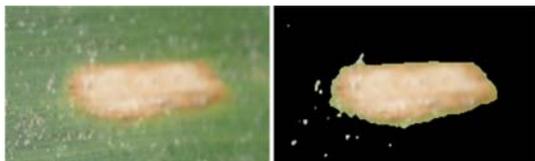


图 5 玉米小斑病及分割结果

Fig. 5 Southern leaf blight of corn and the segmentation result by G-MRF

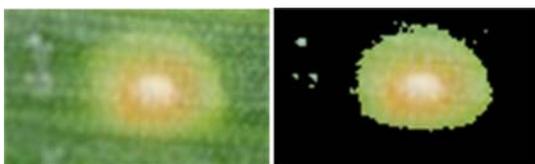


图 6 玉米弯孢叶斑病及分割结果

Fig. 6 *Curvularia* leaf spot of corn and the segmentation result by G-MRF

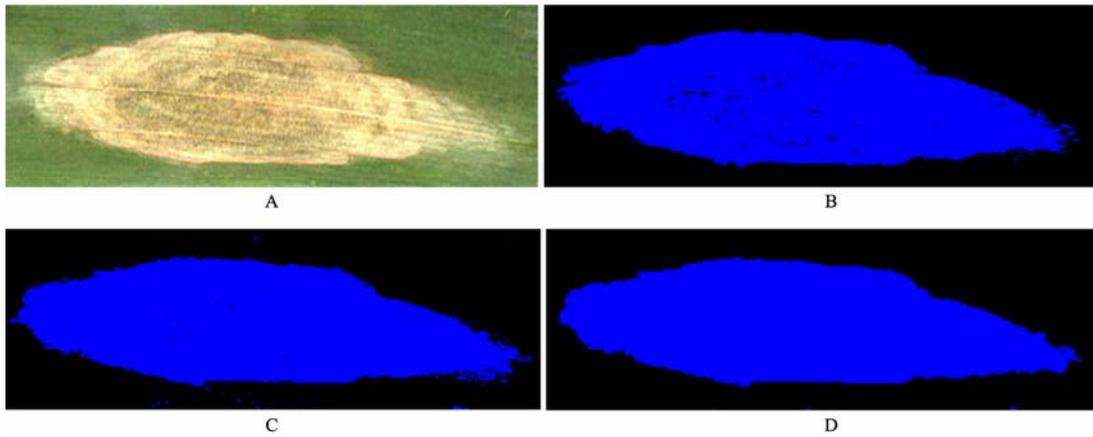
和基于 G-MRF 模型的分割结果。基于阈值以及基于 Gauss 模型的分割结果中有较多的误分点, 分割得到的病斑区域边缘毛刺较多, 与基于 G-MRF 模型的分割效果差别明显, 而基于 G-MRF 模型的分割算法对背景的适应性较强, 算法鲁棒性较好, 分割效果相对稳定。

2.3 不同分割算法分割效果的评价

分割效果评价结果见表。基于阈值、Gauss 模型和 G-MRF 模型的分割算法平均正确分类率分别为 92.78%、92.32%和 96.35%, 其中基于 G-MRF 模型分割算法的正确分类率与其它两种算法的差异达到显著水平, 对 4 种病斑的正确分类率也均显著高于另外两种算法。

3 讨论

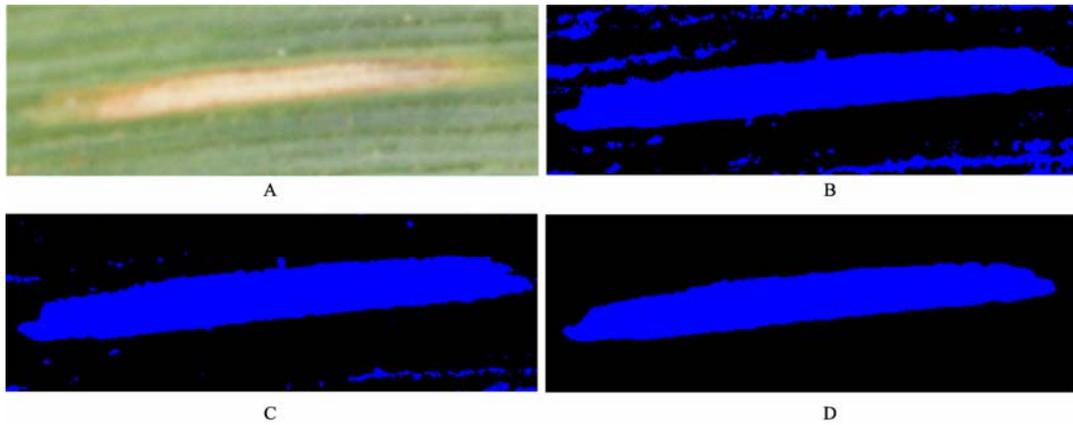
图像分割技术一直是图像研究领域的热点, 目前



A: 大斑病原图; B: 基于阈值分割结果; C: Gauss 模型分割结果; D: G-MRF 模型的分割结果  
 A: The original picture of *Exserohilum turcicum*; B: The segmentation result based on threshold; C: The segmentation result by Gauss model; D: The segmentation result by G-MRF

图 7 玉米大斑病及 3 种算法的分割结果

Fig. 7 Northern leaf blight of corn and the segmentation results by three different algorithms



A: 灰斑病原图; B: 基于阈值分割结果; C: Gauss 模型分割结果; D: G-MRF 模型的分割结果  
 A: The original picture of *Cercospora zeaemaydis* Tehon and Daniels; B: The segmentation result based on threshold; C: The segmentation result by Gauss model; D: The segmentation result by G-MRF

图 8 玉米灰斑病及 3 种算法的分割结果

Fig. 8 The original picture of *Cercospora zeaemaydis* Tehon and Daniels and segmentation results by three kinds of algorithms

表 基于阈值、Gauss 模型以及 G-MRF 模型的分割算法正确分类率 (CCR) 比较

Table CCR contrast of algorithm based on threshold, Gauss model and G-MRF model

分割算法 Segmentation algorithm	大斑 <i>Exserohilum turcicum</i>	小斑 <i>Bipolaris maydis</i>	灰斑 <i>Cercospora zeaemaydis</i> Tehon and Daniels	弯孢 <i>Curvularia lunata</i> Boed	平均值 Mean
基于 G-MRF 的分割算法 G-MRF based segmentation algorithm (%)	98.37a	95.56a	97.84a	96.89a	96.35a
基于 Gauss 模型的分割算法 Gauss based segmentation algorithm (%)	97.33b	87.88c	91.35b	93.38ab	92.32b
基于阈值的分割算法 Threshold segmentation algorithm (%)	96.62ab	92.34b	91.83b	90.85b	92.78b

采用的病害图像分割算法多是在人工控制光照的结构环境下来实现的,在条件一致的结构环境下能够胜任,在自然光照条件下往往不能胜任,目前尚无一种算法可以解决大田开放环境下病害图像分割的问题,难以提供大田病害的机器视觉实时检测识别服务。阈值是根据图像的灰度直方图得到,因为该方图反映了图像的灰度分布特征,容易借助背景和目标的双峰特征选择最优阈值,但是,基于阈值的分割算法<sup>[16-17]</sup>,只有在背景和目标区域的直方图成双峰的情况下才可以获得令人满意的效果。在大田非结构环境下,由于光照的不确定,再加上病斑和叶片都是不断变化的生命体,色彩本身就不均匀,造成病害图像具有模糊性和复杂性,叶片和病斑区域的灰度级范围常常相互重叠,背景和目标区域的直方图并不形成明显的双峰,不存在最优阈值,因此用固定阈值分割图像,误分是不可避免的。基于 Gauss 模型的分割算法<sup>[18-20]</sup>,它假定每个同质区域  $i$  内的像素灰度分布都呈  $(u_i, \sigma_i^2)$  Gauss 分布,首先初始化每个区域  $i$  的  $(u_i, \sigma_i^2)$ ,然后用 EM 算法迭代并更新  $(u_i, \sigma_i^2)$ ,直到样本集合对各个分类的似然函数不再有明显的变化为止。由于叶片和病斑区域的灰度级范围常常相互重叠,聚类初始化不可能完全正确,最终也会导致误分。这两个算法的分割原理虽然有所不同,但共同点是分割的时候完全依赖像素的灰度信息,忽略了病斑颜色和病斑所在位置的关联性。基于 G-MRF 模型的分割算法本质上也是一个 Gauss 模型,但是它在 Gauss 模型的基础之上加上 MRF 约束,既利用了像素的灰度信息,又将像素的空间位置相关联,在一定程度上减少误分点,改善了分割的区域一致性,提高了分割精度。

本研究实现的基于 G-MRF 模型的分割算法对大田开放环境下拍摄的玉米叶斑病典型症状图像能够有效分割,但发病初期病害往往呈褪绿状,颜色和形状不稳定且变化快,后期病斑连片再加上叶片枯黄,该算法不能胜任这两个时期病害图像的分割。该算法的运算量较大,时间复杂度较高,也不适合处理分辨率高、像素太多的图像。由于本研究的测试图像均是从大田拍摄的图像上裁剪得到的,如何使程序自主地从拍摄的图像上得到病斑周围的矩形区域,剔除叶脉及融合的病斑,实现智能裁剪、图像预处理及智能分割还有待进一步研究,以提高图像分割功效。

## 4 结 论

基于阈值和基于 Gauss 模型的分割算法对背景相

对简单的图像能够有效分割,对背景复杂的图像分割效果较差,而 G-MRF 模型分割算法则自适应能力强,误分点较少,分割精度较高,算法稳定性好,能够有效分割玉米叶斑病害图像。

## References

- [1] 应义斌,傅宾忠,蒋亦元,赵 匀. 机器视觉技术在农业生产自动化中的应用. 农业工程学报, 1999, 15(3): 199-203.  
Ying Y B, Fu B Z, Jiang Y Y, Zhao Y. Application of machine vision technique to automation of agricultural production. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(3): 199-203. (in Chinese)
- [2] 冀荣华,祁力钧,傅泽田. 机器视觉技术在精细农业中的研究进展. 农机化研究, 2007 (11): 1-5.  
Ji R H, Qi L J, Fu Z T. Advance in precision agriculture based on the machine vision technology. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007 (11): 1-5. (in Chinese)
- [3] 田有文,李成华. 基于统计模式识别的植物病害彩色图像分割方法. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34(2): 291-293.  
Tian Y W, Li C H. Color image segmentation method based on statistical pattern recognition for plant disease diagnose. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2004, 34(2): 291-293. (in Chinese)
- [4] 张 静,王双喜,董晓志,程鹏飞. 基于温室植物叶片纹理的病害图像处理及特征值提取方法的研究. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 282-285.  
Zhang J, Wang S X, Dong X Z, Cheng P F. A study on method of extract of texture characteristic value in image processing for plant disease of greenhouse. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3): 282-285. (in Chinese)
- [5] 赵玉霞,王克如,白中英,李少昆,谢瑞芝,高世菊. 基于图像识别的玉米叶部病害诊断研究. 中国农业科学, 2007, 40(4): 698-703.  
Zhao Y X, Wang K R, Bai Z Y, Li S K, Xie R Z, Gao S J. Research of maize leaf disease identifying system based image recognition. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 698-703. (in Chinese)
- [6] 冯登超,杨兆选,乔晓军. 基于改进型蚁群算法和 Gauss-Markov 随机场的植物病斑自适应分割. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 391-394.  
Feng D C, Yang Z X, Qiao X J. Adaptive segmentation of plant disease spot based on improved ant colony algorithm and Markov random field. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(3): 391-394. (in Chinese)
- [7] 赖军臣,李少昆,明 博,王 娜,王克如,谢瑞芝,高世菊. 作物病害机器视觉诊断研究进展. 中国农业科学, 2009, 42(4):

- 1215-1221.
- Lai J C, Li S K, Ming B, Wang N, Wang K R, Xie R Z, Gao S J. Advances in research on computer-vision diagnosis of crop diseases. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4): 1215-1221. (in Chinese)
- [8] 陈佳娟, 纪寿文, 李娟, 赵学笃. 采用计算机视觉进行棉花虫害程度的自动测定. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 157-160.
- Chen G J, Ji S W, Li J, Zhao X D. Automatic measurement of danger degree of cotton insect pests using computer vision. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(2): 157-160. (in Chinese)
- [9] 林晓燕, 刘文耀, 陈晓冬, 曹茂永. 杨树病害孢子的图像识别技术研究. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 364-366.
- Lin X Y, Liu W Y, Chen X D, Cao M Y. Spore image recognition of poplar disease. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 364-366. (in Chinese)
- [10] 毛罕平, 张艳诚, 胡波. 基于模糊 C 均值聚类的作物病害叶片图像分割方法研究. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 136-140.
- Mao H P, Zhang Y C, Hu B. Segmentation of crop disease leaf images using fuzzy C-means clustering algorithm. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 24(9): 136-140. (in Chinese)
- [11] 岑喆鑫. 基于计算机视觉技术的黄瓜叶部病害自动诊断研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- Cen J X. Study on the automatic diagnosis technology of the cucumber leaf diseases based on computer vision[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)
- [12] 金炎芳, 张定华, 赵歆波, 陈志强, 张东平. 基于混合 Gauss 模型 MRF 场的 CT 图像分割. *计算机应用研究*. *计算机应用研究*, 2007, 24(6): 176-180.
- Jin Y F, Zhang D H, Zhao X B, Chen Z Q, Zhang D P. CT image segmentation based on mixture gauss markov random field models. *Application Research of Computer*, 2007, 24(6): 176-180. (in Chinese)
- [13] 王文辉, 冯前进, 刘磊, 陈武凡. 基于类自适应高斯-马尔科夫随机场模型和 EM 算法的 MR 图像分割. *图形图像学报*, 2008, 13(3): 488-493.
- Wang W H, Feng Q J, Liu L, Chen W F. Segmentation of brain MR images through class-adaptive Gauss-Markov random field model and the EM algorithm. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(3): 488-493. (in Chinese)
- [14] Zhang Y Y, Brady M, Smith S. Segmentation of brain MR images through a hidden Markov random field model and the expectation-maximization algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 20(1): 45-57.
- [15] Christophoros N, Galatsanos N, Likas A. A class-adaptive spatially variant mixture model for image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(4): 1121-1130.
- [16] 王永波, 陈继荣. 二维 Otsu 阈值分割算法的改进及应用. *计算机仿真*, 2008, 25(4): 263-266.
- Wang Y B, Chen J R. Improvement of two-dimensional Otsu algorithm and its application. *Computer Simulation*, 2008, 25(4): 263-266. (in Chinese)
- [17] 阴国富. 基于阈值法的图像分割技术. *现代电子科技*, 2007, 262(23): 107-108.
- Yin G F. Image segmentation technology based on thresholding. *Modern Electronics Technique*, 2007, 262(23): 107-108. (in Chinese)
- [18] 燕志征. 利用高斯混合模型和 EM 算法分割彩色图像. *现代电子技术*, 2005, 211(20): 103-107.
- Yan Z Z. Segmentation of color images via Gaussian mixer model and EM algorithm. *Modern Electronics Technique*, 2005, 211(20): 103-107. (in Chinese)
- [19] 余鹏, 封举富, 童行伟. 一种新的基于高斯混合模型的纹理图像分割方法. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(6): 514-517.
- Yu p, Feng J F, Tong X W. A new textured image segmentation algorithm based on Gaussian mixture models. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(6): 514-517. (in Chinese)
- [20] 张建伟, 陈允杰, 夏德深. 基于高斯混合模型的脑部 MR 图像自动分割. *计算机工程与应用*, 2006, 24(4): 207-210.
- Zhang J W, Chen Y J, Xia D S. Auto segmentation of brain MR image based on Gaussian mixture model diffusion. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 24(4): 207-210. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)