

玉米自动化考种过程的粘连籽粒图像分割

张新伟^{1,5} 易克传^{1,5} 刘向东² 赵学观³ 程昕昕^{4,5} 高连兴^{6*}

(1. 安徽科技学院 机械工程学院,安徽 凤阳 233100;2. 新疆大学 科学技术学院,新疆 阿克苏 843000;
3. 北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097;4. 安徽科技学院 农学院,安徽 凤阳 233100;
5. 玉米育种安徽省工程技术研究院,安徽 凤阳 233100;6. 沈阳农业大学 工程学院,沈阳 100866)

摘要 针对玉米自动化考种过程籽粒粘连导致穗粒数统计准确率低的问题,提出一种遗传算法(GA)与改进脉冲耦合神经网络(PCNN)相结合的分割方法(GA+改进PCNN),对粘连玉米籽粒图像的分割问题进行研究。采用数学形态学和wiener滤波对待分割图像去噪,基于小波变换进行多图像融合得到新图像;利用遗传算法寻找改进PCNN模型中参数 β 、 α_E 和 V_E 的最优解并进行图像分割。结果表明:1)本研究方法对粘连玉米籽粒的分割准确率为98%;2)本研究方法的交叉熵、区域内部均匀性、形状测度维和区域对比度指标依次为0.079 4、0.975 4、0.878 5和0.869 2,总体优于OTSU、改进分水岭、迭代法全局阈值和未改进PCNN分割算法;3)本研究方法的单幅图像处理时间为22.07 s,用时长于各比较算法,但分割效果最理想。

关键词 玉米籽粒; 自动化考种; 籽粒粘连; 图像分割

中图分类号 S513; S226.1

文章编号 1007-4333(2018)10-0144-08

文献标志码 A

Image segmentation of adhesive corn seeds during automatic seed test

ZHANG Xinwei^{1,5}, YI Kechuan^{1,5}, LIU Xiangdong², ZHAO Xueguan³,
CHENG Xinxin^{4,5}, GAO Lianxing^{6*}

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China;
2. School of Science and Technology, Xinjiang University, Akesu 843000, China;
3. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China;
4. School of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China;
5. Institute of Corn Breeding Engineering and Technology of Anhui Province, Fengyang 233100, China;
6. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract In order to solve the problem of segment difficulty caused by seeds adhesion during automatic seeds test, a new segmentation method was proposed in this study. Image segmentation algorithms combing genetic algorithms (GA) and improved pulse coupled neural net (PCNN) model were adopted. To improve contrast between the adhesive corn seeds and image background, adhesive corn seeds were pretreated to remove noise by using mathematical morphology and wiener method, multi-scale decomposed based on wavelet transform, and reconstruct images by using data fusion. The optimal parameters of β , α_E and V_E in the PCNN model were obtained by genetic algorithm. Small distracter of the segmented image were removed with the PCNN's automatic porter sign. The adhesion grain segmentation image was finally obtained. The results showed that: 1) The accuracy of image segmentation algorithm by combing GA and adaptive pulse coupled neural net (PCNN) was 98% (the highest); 2) The cross entropy, regional uniformity, shape measure dimension and region contract indexes proposed in this study were respectively 0.079 4,

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1501031095);安徽科技学院自然科学研究项目(ZRC2016481);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0542、KJ2018A0543)

第一作者: 张新伟,讲师,博士,主要从事农业机器人与智能农业装备研制,E-mail: xwzhang1983@163.com

通讯作者: 高连兴,教授,博士生导师,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail: lianxing_gao@126.com

0.975 4, 0.878 5 and 0.869 2, which were superior to OTSU, improved watershed algorithm, iteration method global threshold algorithm and not improved PCNN algorithm; 3) The running time of GA + improved PCNN algorithm was 22.07 s, which was longer than the rest, but the segmentation effect of GA + improved PCNN algorithm program was the best.

Keywords corn seeds; automatic seeds test; grain adhesion; image segmentation

考种是玉米育种过程的重要环节。考种指标包括穗长、穗粗、穗重、穗行数和穗粒数,其中穗粒数是影响玉米产量的重要参数^[1]。当前穗粒数的统计方法主要有 2 种^[2],一是人工计数,二是利用机器视觉技术统计。该方法运行速度快,但准确率较低,原因是玉米籽粒之间间隔距离很小,甚至相互粘连在一起。

国内外已开展相关研究并提出许多方法:1)采用分水岭及其改进方法进行分割^[3-7];2)阈值法分割^[8-10];3)主动轮廓模型方法分割^[11-12];4)数学形态学方法分割^[13-15]。分析发现:阈值分割属经典分割方法,分割结果极易受到噪声等干扰因素的影响,而分水岭算法的过分割问题一直不能得到有效抑制,严重影响粘连种子(果实)的分割效果,主动轮廓模型虽然是一种半自动的分割方法,但其分割效果主要取决于输入的初始曲线,且程序运行时间过长。此外,相互粘连的玉米籽粒间相邻边界紧密重叠,并且不同品种玉米籽粒形状复杂,所以传统的阈值分割、分水岭以及区域生长等分割算法都很难达到满意的分割效果,不利于玉米果穗考种指标的计量分析。

近年来兴起的脉冲耦合神经网络算法(Pulse Coupled Neural Net, PCNN)是在对哺乳动物视觉神经网络的特性研究基础上提出来的全新算法,具有任何现有图像分割算法所不具有的优良特性,已

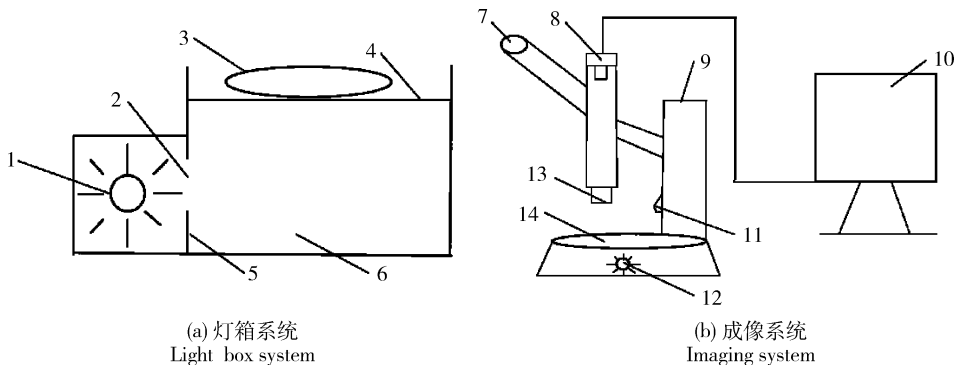
被普遍应用于诸多生产邻域^[16-22],但其连接系数和阈值的幅度系数及阈值衰减时间常数等仍需要通过经验或多次反复试验来确定,而遗传算法(Genetic Algorithms, GA)可以利用简单的编码和繁殖技术来处理那些用传统方法难以解决的复杂的或非线性的问题,是一种具有“生成+检测”的迭代过程搜索算法,在图像处理领域应用广泛^[23]。基于此,本研究拟将改进 PCNN 和 GA 两者相结合,利用 GA 的解空间随机搜索能力,来寻求 PCNN 模型关键参数的最优值,以期解决玉米自动化考种过程中的粘连籽粒分割问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验玉米为凤甜 11,选自玉米育种安徽省工程技术研究院。取玉米果穗 50 个,每个果穗采集 2 幅图像,共计 100 幅图像作为待测试对象。

图像采集系统由灯箱系统和成像系统组成(图 1),其中成像系统由尼康 SMZ800 立体显微镜(放大范围 0.75~7.5 倍)、佳能 PowerShot SX700 HS (1 600 万像素)和计算机(联想扬天 T4 900D,酷睿 i3-7 100,4 G 内存,500 GB 硬盘)等组成,该系统可以方便地调整图像倍数,获取粘连玉米籽粒图像并进行观察和分析。



1. 灯泡;2. 通光孔;3. 玉米果穗;4. 玻璃;5. 遮光板;6. 光箱;7. 目镜;8. 摄像头;9. 支架;10. 微型计算机;11. 反射光源;12. 透射光源;13. 物镜;14. 载物台
1. Bulb; 2. Clear aperture; 3. Corn ear; 4. Glass; 5. Visor; 6. Light box; 7. Eyepiece; 8. Camera; 9. Holder; 10. Computer; 11. Reflected light; 12. Transmission light source; 13. Objective; 14. Objective table

图 1 图像采集系统结构示意图

Fig. 1 Structure chart of image acquisition system

1.2 试验方法

1.2.1 图像预处理

数码相机所得图像的分辨率为 1 600 像素 × 1 200 像素,图像格式为 JPG,将其下采样为 640 像素 × 480 像素大小以提高算法运行速度。

运用数学形态学和 Wiener 滤波分别对玉米果穗图像去噪。对处理后的图像进行基于小波变换的多尺度分解,重构后得到新图像。

1.2.2 图像分割

运用 GA+改进 PCNN 相结合的方法对粘连籽粒图像进行分割处理,并将分割结果与未改进 PCNN、改进分水岭、OTSU 和迭代法全局阈值分割算法比较。借助分割准确率、交叉熵、区域内部均匀性、形状测度准则、区域对比度和运行时间 6 个指标对本研究方法的分割性能进行定量评估。

分割准确率是指被正确分割的玉米种子比例。

1.2.3 使用 PCNN 自动波特性消除小面积干扰物

分割后图像背景上存在黑点或白点,影响粘连籽粒的分割效果。苏茂君等^[24]研究发现,PCNN 不同于传统人工神经网络的显著属性是其具有自动波特征,所以通过调整 PCNN 的参数改变自动波的传播特性,消除图像背景存在的小面积干扰物。

玉米粘连籽粒分割流程见图 2。

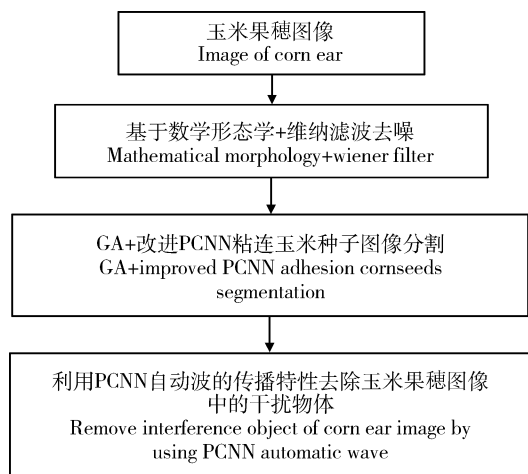


图 2 粘连玉米籽粒图像分割流程

Fig. 2 Chart of image segmentation of touching corn kernels

2 基于 PCNN 和遗传算法的玉米粘连籽粒分割

2.1 PCNN 模型改进

传统 PCNN 数学描述如下:

$$\begin{aligned} F_{ij}(n) &= e^{-\alpha_F \Delta t} F_{ij}(n-1) + \\ &V_F \sum_{k,l} M_{ijkl} Y_{kl}(n-1) + S_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L_{ij}(n) &= e^{-\alpha_L \Delta t} L_{ij}(n-1) + \\ &V_L \sum_{k,l} W_{ijkl} Y_{kl}(n-1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$U_{ij}(n) = F_{ij}(n)(1 + \beta L_{ij}(n)) \quad (3)$$

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, U_{ij}[n] > E[n-1] \\ 0, U_{ij}[n] \leq E[n-1] \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{ij}[n] = e^{-\alpha_E} E_{ij}[n-1] + V_E Y_{ij}[n] \quad (5)$$

式中: β 为内部活动项的连接系数; S_{ij} 为神经元强限制激发的外部激励值; V_F 为反馈输入域中放大系数; α_F 为反馈输入域中衰减时间常数; U_{ij} 为神经元的内部活动项; Y_{ij} 为神经元的输出,当输出由 0 增大至 1 时为神经元的点火, V_L 为耦合连接域 L 的放大系数; α_L 为耦合连接域 L 的衰减时间常数; M_{ijkl} 为反馈输入域的连接矩阵; W_{ijkl} 为耦合连接域的连接矩阵; F_{ij} 为神经元的反馈输入; L_{ij} 为连接输入; α_E 为动态门限 E 的衰减时间常数; V_E 为动态门限 E 的放大系数。

经典 PCNN 在进行图像分割时主要借助其激活和阈值衰减特性,这种特性的变化符合人眼在视觉成像过程中对灰度响应的要求,但在本研究中,由于玉米果穗上籽粒相互间是紧密连接在一起的,这就使得玉米籽粒与图像背景之间的像素灰度相似程度较弱,从而导致不能正确对粘连玉米籽粒分割。

为更有效的适应自动考种过程中玉米果穗粘连籽粒准确分割的要求,借助 PCNN 模型中神经元具有的抑制特性,同时再结合遗传算法的迭代搜索能力,对 PCNN 模型分割得到图像的子区域进行重新分解逐层分割,直至图像背景与玉米籽粒分开,此时得到序列即为分割的最终结果,改进算法为:

$$F_{ij}(n) = I_{ij} \quad (6)$$

$$L_{ij}(n) = \sum \omega_{ijkl} Y_{kl}[n-1] \quad (7)$$

$$U_{ij}[n] = F_{ij}[n](1 + \beta L_{ij}[n]) \quad (8)$$

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1, U_{ij}[n] > E[n-1] \\ 0, U_{ij}[n] \leq E[n-1] \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{ij}[n] = \exp(-\alpha_E) E_{ij}[n-1] + V_E Y_{ij}[n] \quad (10)$$

开始分割时,首先激活玉米果穗图像的所有像素,并根据式(6)~(10)生成下一次迭代所需要的阈值,如此往复循环,直至 W 的邻域像素中至少有 1 个像素灰度低于迭代阈值时,由其抑制产生的脉冲

输出依次传递将会引起附近其他类似灰度像素对应神经元的抑制,从而得到一系列的序列 \mathbf{Y} ,其中第 n 次离散时间时得到的输出序列 \mathbf{Y}_n 构成的二值图像即为目标图像。

在式(6)~(10)的改进 PCNN 模型中,涉及 \mathbf{W} , β , α_E 和 \mathbf{V}_E 这 4 个参数,其中 \mathbf{W} 设置简单,所有情景下数值可以不变,取值为像素之间距离平方的倒数。另外 3 个参数的设置需要通过多次试验方可确定,本研究利用遗传算法的迭代搜索能力在其解空间寻求准最优解。

2.2 遗传算法

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机优化算法^[25],其主要特点是群体搜索策略和群体中个体间的信息交换,能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识、自适应的控制搜索过程以求得最优解或近似最优解。

遗传算法使用二进制遗传编码,且繁殖分为交叉、变异与复制多个独立的步骤进行。基本执行过程如下:

1)初始化。确定种群规模 N 、迭代次数 G 、交叉概率 P_C 、变异概率 P_m 和终止进化准则;随机生成 N 个个体作为初始种群 $X(0)$;置进化迭代计数器 $t \rightarrow 0$ 。

2)个体评价。计算或评估 $X(t)$ 中各个个体的适应度。

3)种群进化。分别以概率 P_C 和 P_m 对个体进行交叉、变异操作。然后依适应度选择出 N 个个体组成新一代种群 $X(t+1)$ 。

4)终止检验。如果已满足终止准则,则输出 $X(t+1)$ 中具有最大适应度的个体为最优解,中止计算;否则置 $t \leftarrow t+1$ 并转 3)。

2.3 分割步骤

参照文献[26],并通过多次试验调整参数,分割步骤如下:

1)初始化:设置群体规模 $N=30$,进化代数 $G=180$,交叉概率 $P_C=0.8$ 和变异概率 $P_m=0.01$,染色体长度=60;读入粘连玉米籽粒图像。

2)对 30 个个体进行解码,代入 PCNN 标准模型,计算输出图像的熵值,计算个体的适应值;令 $G=1$ 。

3)开始循环。

4)开始遗传操作:精英选择、双点交叉、基本变异。

5)对 30 个个体进行解码,代入 PCNN 改进模

型,计算输出图像的熵值;计算个体的适应度。

6)判断是否满足终止准则;不满足, $G=G+1$ 转到 3),继续循环。

7)满足,进化(循环)终止,输出分割图像。

3 分割效果评价

本研究采用典型的评价指标对不同分割算法的性能进行定量评价。

3.1 交叉熵准则

设有 2 个概率分布 $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 和 $\mathbf{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$,若用交叉熵来度量它们之间的信息量差异,则其对称形式为:

$$D(\mathbf{P};\mathbf{Q}) = \sum_{i=1}^N p_i \ln \frac{p_i}{q_i} + \sum_{i=1}^N q_i \ln \frac{q_i}{p_i} \quad (11)$$

式中: P 为处理前的原始图像; Q 为分割后的结果图像; N 为图像像素数。交叉熵的值越小,说明所用算法性能越好。

3.2 区域内部均匀性

设 R_i 表示第 i 个区域, A_i 表示其面积,则分割图像的均匀性测度为:

$$RU = 1 - \frac{1}{C} \sum_i \left\{ \sum_{(x,y) \in R_i} [f(x,y) - \frac{1}{A_i} \sum_{(x,y) \in R_i} f(x,y)]^2 \right\} \quad (12)$$

式中: C 为归一化因子, n 为第 i 个区域内的像素数。RU 值越大,分割效果就越好,算法性能也越好。

3.3 形状测度维数

形状测度计算公式为:

$$S(t) = \frac{1}{C} \sum_{(x,y)} \text{sgn}[f(x,y) - f_N(x,y)] \cdot \Delta(x,y) \text{sgn}[f(x,y) - t] \quad (13)$$

式中: $f_N(x,y)$ 为邻域 $N(x,y)$ 的灰度均值, $\Delta(x,y)$ 为广义梯度, $\text{sgn}(x)$ 为符号函数, t 为灰度阈值。S 值越大,说明分割效果越好,对目标轮廓光滑程度也就越好。

3.4 区域对比度

图像二值分割是按照目标和背景的灰度差异将图像分割成 2 个不同的区域,如果这 2 个区域的灰度对比度较大,则也可以推断出所用分割算法的性能优劣。对于目标和背景这 2 个区域来说,如果它们各自的平均灰度分别为 f_o 和 f_b ,则它们之间的灰度对比度计算公式表示如下:

$$C(t) = \frac{|f_o - f_b|}{f_o + f_b} \quad (14)$$

式中： f_t 为目标区域的平均灰度； f_b 为背景区域的平均灰度。灰度对比度越大，则分割效果就越好。

4 结果与分析

为比较本研究方法与比较算法的分割效果，同

时也是为了说明算法性能与评价准则间的联系，选用未改进 PCNN、OTSU、改进分水岭、迭代法全局阈值以及 GA+改进 PCNN 方法分别对凤甜 11 品种玉米进行分割实验。各种算法均在 Matlab 2015b 环境下实现，不同算法的分割评价指标见表 1。

表 1 不同算法对凤甜 11 分割指标比较

Table 1 Segmentation index comparison of different segment algorithms for Fengtian 11

分割方法 Partition methods	准确率/% Accuracy	交叉熵 CE	区域内部均匀性 RU	形状测度维数 SM	区域对比度 CM	运行时间/s Elapsed time
OTSU	75	0.077 1	0.983 7	0.863 7	0.776 5	1.91
改进分水岭 Improved watershed algorithm	81	0.094 6	0.980 2	0.863 2	0.725 5	5.12
迭代法全局阈值 Iteration method global threshold	86	0.149 2	0.968 0	0.881 6	0.694 8	3.08
未改进 PCNN Unimproved PCNN	93	0.078 7	0.974 0	0.873 5	0.807 9	3.72
本研究方法 Algorithm in this study	98	0.079 4	0.975 4	0.878 5	0.869 2	22.07

可以看出，本研究方法的分割准确率最高，为 98%，超过迭代法全局阈值分割方法 12%，比 OTSU 算法高 23%，并且分割效果较未改进前高 5 个点。此外，交叉熵指标方面，本研究方法与未改进前几乎相同，略高于 OTSU，均远远优于改进分水岭和迭代法全局阈值分割 2 种方法；在区域内部均匀性指标上，本研究方法为 0.975 4，仅比 OTSU 和改进分水岭低 0.008 3 和 0.004 8，但高于改进前 PCNN 和迭代法分割；形状测度维数指标方面，本研究方法低于迭代法全局阈值分割方法 0.003 1，但远高于 OTSU、改进分水岭和改进前 PCNN 3 种算法；在区域对比度指标方面，本研究所提方法为 0.869 2，高出改进前 PCNN 算法 0.061 3，且远高于另外 3 种比较算法；本研究方法单幅图像处理时间为 22.07 s，运行时间长于其他分割算法，原因可能是本方法涉及到遗传算法，需要进化多代才能得到最优的分割结果，本研究中进行到第 30 代。

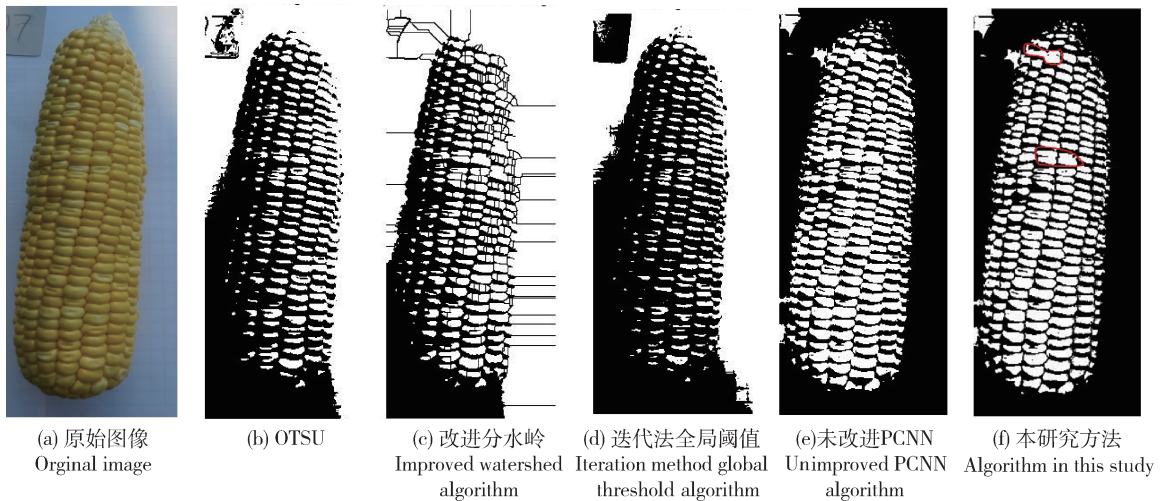
不同分割算法对粘连籽粒的分割效果见图 3。可以看出，结合距离变换的改进分水岭分割方法仍然存在过分割(图 3(c))，研究结果与张新伟等^[13]的研究结果一致。原因是分水岭变换的目标是求出梯度图像的“分水岭线”，而传统的差分梯度算法对邻近像素做差分运算，容易受到噪声和量化误差等因

素的影响，往往会在灰度均匀的区域产生过多的局部梯度，这些在分水岭变换中就对应于集水盆底。与改进分水岭算法相比，OTSU 和迭代法全局阈值分割算法均不存在过分割问题，但很多的玉米籽粒并没有被分割出来，出现目标数据丢失，原因可能是 OTSU 和迭代法全局阈值分割均属于经典的阈值分割，这类分割算法对于目标和背景对比度反差较大的图像能够进行有效分割，并且总能够用封闭、连通的边界定义不交叠的边界，但分割阈值的确定主要依赖于灰度直方图，而很少考虑图像中像素的空间位置关系，因此当背景复杂，特别是同一背景上重叠出现多个研究目标时，容易丧失部分边界信息，造成分割的不完整。同时发现，OTSU、改进分水岭和迭代法全局阈值 3 种算法的分割结果中出现大块的黑色区域(图 3(b)~(d))，可能是因为 OTSU 等传统的分割方法所采用的算子几乎都是经过差分、微分或梯度等运算进行检测，即在背景灰度不均匀时将出现过分割或欠分割，导致目标和背景不能准确判定及分割，从而在分割后的图像上出现大块黑色区域，导致分割后的部分目标籽粒和背景信息的丢失。与其他分割方法相比，本研究方法分割效果最优，且分割效果明显好于改进前 PCNN 的分割效果，同时与表 1 和视觉主观评价观察结果一致，是因

为借助 PCNN 模型中神经元具有的抑制特性,改善了玉米籽粒与图像背景之间的像素灰度相似程度,同时再结合遗传算法的迭代搜索能力,对 PCNN 模型分割得到图像的子区域进行重新分解逐层分割,最终将相互粘连玉米籽粒分开。

本方法仍存在少量粘连玉米籽粒无法分开的现象(图 3(f),红色标记部分),原因是尽管在本研究

中使用遗传算法,使 PCNN 模型需要设置的参数大幅减少,但对于具体的玉米粘连籽粒的分割,其关键参数(如连接系数等)仍然要通过较多次的试验才能进行设定,算法自适应性较低,导致部分粘连籽粒不能准确分割。后续研究拟从图像信息熵、图像梯度等方面对 PCNN 模型进行更深入研究,以期实现 PCNN 模型参数的自动设定。



(f)图中,红色标记部分为未能成功分割的粘连籽粒。

(f): The red marks in figure f were adhesive grains which can't be separated successfully.

图 3 不同算法对凤甜 11 分割效果比较

Fig. 3 Effect comparison of different segment algorithm for Fengtian11

5 结 论

本研究针对玉米自动化考种过程存在的籽粒粘连问题进行研究,主要结论如下:

1)利用 PCNN 的生物视觉特性和 GA 的解空间随机搜索能力,提出 GA+改进 PCNN 相结合的粘连籽粒分割方法,分割准确率最高,为 98%。

2)本研究方法的交叉熵、区域内部均匀性、形状测度维数和区域对比度 4 项评价指标分别为 0.079 4、0.975 4、0.878 5 和 0.869 2,总体优于其他比较算法。

3)本研究方法单幅玉米果穗图像处理时间为 22.07 s,运行时间长于各比较算法,但分割效果最理想。

参考文献 References

[1] 刘长青,陈兵旗. 基于机器视觉的玉米果穗参数的图像测量方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 131-138

Liu C Q, Chen B Q. Method of image detection for ear of corn based on computer vision [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 131-138 (in Chinese)

[2] 吴刚,陈晓琳,谢驾宇,郑永军,李伶俐,谭俊松. 玉米果穗自动考种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 433-441

Wu G, Chen X L, Xie J Y, Zheng Y J, Li L H, Tan J S. Design and experiment of automatic variety test system for corn ear[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(S1): 433-442 (in Chinese)

[3] 柳冠依,刘平义,魏文军,张绍英,李海涛. 玉米果穗粘连籽粒图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 285-290
Liu G Y, Liu P Y, Wei W J, Zhang S Y, Li H T. Method of image segmentation for touching maize kernels[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 285-290 (in Chinese)

[4] 宋鹏,张晗,王成,罗斌,赵勇,潘大宇. 玉米籽粒考种信息获取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 19-25

Song P, Zhang H, Wang C, Luo B, Zhao Y, Pan D Y. Design and experiment of maize kernel traits acquisition device [J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 19-25 (in Chinese)
- [5] 宋鹏, 张哈, 王成, 罗斌, 路文超, 候佩臣. 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 P, Zhang H, Wang C, Luo B, Lu W C, Hou P C. Design and experiment of high throughput automatic measuring device for corn[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 41-47 (in Chinese)
- [6] 权龙哲, 辛伯来, 奚德君, 张明俊. 粘连玉米粒群的分水岭分割与粒形的多尺度小波校正算法研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(2): 191-196
Quan L Z, Xin B L, Xi D J, Zhang M J. Automation segmentation method of touching corn kernels in digital image based on improved watershed algorithm[J]. *China Science Paper*, 2016, 11(2): 191-196 (in Chinese)
- [7] 张亚秋, 吴文福, 王刚. 基于逐渐改变阈值方法的玉米种子图像分割[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 200-204
Zhang Y Q, Wu W F, Wang G. Separation of corn seeds images based on threshold changed gradually[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 200-204 (in Chinese)
- [8] 荀一, 鲍官军, 杨庆华, 高峰, 李伟. 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
Xun Y, Bao G J, Yang Q H, Gao F, Li W. Automatic segmentation of touching corn kernels in digital image[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 163-167 (in Chinese)
- [9] 凌云, 王一鸣, 孙明, 张小超. 基于流域算法的谷物籽粒图像分割技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 95-98
Ling Y, Wang Y M, Sun M, Zhang X C. Application of watershed algorithm to paddy image segmentation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(3): 95-98 (in Chinese)
- [10] 杨蜀秦, 何东健. 连接大米籽粒图像的自动分割算法研究[J], 农机化研究, 2005(3): 62-65
Yang S Q, He D J. Automated identification and separation of touching rice grains with machine vision[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2005(3): 62-65 (in Chinese)
- [11] 张新伟. 玉米种子内部机械裂纹特征与识别研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012
Zhang X W. Study on characteristic and identification of internal mechanical cracks of crackseeds [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [12] 杨蜀秦, 宁纪锋, 何东健. 一种基于主动轮廓模型的连接米粒图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 207-211
Yang S Q, Ning J F, He D J. Image segmentation algorithm of touching rice kernels based on active contour model[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 207-211 (in Chinese)
- [13] Shatadal P, Jayas D S, Bulley N R. Digital image analysis for software separation and classification of touching grains: I. disconnect algorithm [J]. *Transactions of the American Society Agricultural and Biological Engineers*, 1995a, 38(2): 635-643
- [14] Shatadal P, Jayas D S, Bulley N R. Digital image analysis for software separation and classification of touching grains: II. classification [J]. *Transactions of the American Society Agricultural and Biological Engineers*, 1995b, 38(2): 645-649
- [15] Kantip K, Wasin S. Segmentation algorithm for touching round grain image [C]. In: *Proceedings of 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*, Hangzhou: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 1263-1266
- [16] 张新伟, 易克传, 高连兴. 基于脉冲耦合神经网络的粘连玉米种子图像分割[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 208-215
Zhang X W, Yi K C, Gao L X. Image segmentation of touching corn seeds based on PCNN[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(3): 208-215 (in Chinese)
- [17] 贺付亮, 郭永彩, 高潮. 复杂环境下用于人体目标红外图像分割的改进 PCNN 方法[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 1-10
He F L, Guo Y C, Gao C. Improved PCNN method for human target infrared image segmentation under complex environments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 1-10 (in Chinese)
- [18] 张栋冰. 基于 TOPHAT-PCNN 的图像车辆目标检测方法研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 590-597
Zhang D B. Research on vehicle detection based on TOPHAT-PCNN [J]. *Journal of Nanjing University: Natural and Science*, 2017, 53(3): 590-597 (in Chinese)
- [19] 马冬梅, 李金凤, 刘勍. 基于改进 3D-PCNN 的中药材彩色显微图像分割[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 46-52
Ma D M, Li J F, Liu Q. Segmentation of traditional Chinese medicine materials color microscopic images based on improved three dimensional pulse coupled neural network[J]. *Journal of Northwest Normal University: Natural and Science*, 2017, 53(2): 46-52 (in Chinese)
- [20] 戴文战, 潘树伟, 李俊峰. 基于人眼视觉特性与自适应 PCNN 的医学图像融合算法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(7): 808-816
Dai W Z, Pan S W, Li J F. Medical image fusion algorithm based on human visual features and adaptive PCNN [J]. *Journal of Optoelectronics and Laser*, 2017, 28(7): 808-816 (in Chinese)
- [21] 贺付亮, 郭永彩, 高潮, 陈静. 基于视觉显著性和脉冲耦合神经网络的成熟桑葚图像分割[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 148-155

- He F L, Guo Y C, Gao C, Chen J. Image segmentation of ripe mulberries based on visual saliency and pulse coupled neuralnetwork[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (6): 148-155 (in Chinese)
- [22] 徐黎明, 吕继东. 基于最小交叉熵的改进 PCNN 杨梅图像分割算法[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(1): 43-47
- Xu L M, Lu J D. Improved PCNN bayberry image segmentation algorithm based on minimum cross entropy[J]. *Journal of Northwest Normal University: Natural and Science*, 2016, 52(1): 43-47(in Chinese)
- [23] 王艳, 沈晓宇, 丁文胜, 王健波, 邹秀阳. 基于 PCNN 和遗传算法相结合的新型混凝土桥梁裂缝检测方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(10): 3197-3200
- Wang Y, Shen X Y, Ding W S, Wang J B, Zhou X Y. New crack detection method of concrete bridge based on PCNN and genetic algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2017, 34(10): 3197-3200 (in Chinese)
- [24] 苏茂君, 王兆滨, 张红娟, 马义德. 基于 PCNN 自动波特征的血细胞图像分割和计数方法[J]. 中国生物医学工程学报, 2009, 28(1): 145-152
- Su M J, Wang Z B, Zhang H J, Ma Y D. A new method for blood cell image segmentation and counting based on PCNN and its autowave characteristic [J]. *Chinses Journal of Biomedical Engineering*, 2009, 28(1): 145-152 (in Chinese)
- [25] 马义德, 李廉, 旋昆. 脉冲耦合神经网络与数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2008
- Ma Y D, Li L, Zhan K. *Pulse Coupled Neural Net and Digital Image Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese)
- [26] 马义德, 齐春亮. 基于遗传算法的脉冲耦合神经网络自动系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 722-724
- Ma Y D, Qi C L. Study of automated PCNN system based on genetic algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(3): 145-152 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春