

# 基于并行点火 PCNN 的玉米病害彩色图像分割方法<sup>\*</sup>

王守志<sup>1,2</sup> 何东健<sup>1</sup> 韩金玉<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 威海职业学院机电工程系, 威海 264210;  
3. 威海职业学院信息工程系, 威海 264210)

**【摘要】** 以提高玉米叶部病害检测精度为目标, 提出一种基于并行 PCNN 的玉米病害彩色图像非监督分割方法。该方法是在 CIE LUV 颜色空间中以归一化的  $L + U$  特征值为外部激励输入, 以邻域像素间几何距离与色度差的综合信息为 PCNN 耦合连接域权值, 以颜色矢量的最小色差对比度为最佳分割结果判别准则, 用改进型并行 PCNN 对玉米病害彩色图像进行分割。对 4 种病害 100 幅图像的分割实验表明, 该方法分割效果较好, 适应度较高, 参数设置复杂度低。

**关键词:** 玉米病害 图像处理 并行 PCNN 彩色图像分割

中图分类号: S435.131; TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0148-06

## Color Image Segmentation Method for Corn Diseases Based on Parallelized Firing PCNN

Wang Shouzhi<sup>1,2</sup> He Dongjian<sup>1</sup> Han Jinyu<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Weihai Vocation College, Weihai 264210, China  
3. Department of Information Engineering, Weihai Vocation College, Weihai 264210, China)

### Abstract

A kind of unsupervised segmentation processing method based on parallelized firing PCNN algorithm was proposed. The color images of corn disease were segmented by improved parallelized firing PCNN which the normalized  $L + U$  as external stimulus input, the integrated information of the geometric distance and the color difference between neighboring pixels as the PCNN coupling value, the minimum color contrast of color vector as the criteria of the best segmentation results, in parallel with improved disease of maize PCNN to segment color images. The segmentation experiments which 100 images of four kinds of diseases showed that the method could better segment the diseased regions with high fitness and low complexity parameters.

**Key words** Corn diseases, Image processing, Parallelized firing PCNN, Color image segmentation

### 引言

应用机器视觉技术自动诊断植物病害对植物保护具有重要意义, 与人工方式相比, 既降低了劳动强度, 又提高了工作质量。植物病害图像存在信息成分繁杂、颜色分布不均、病斑边界模糊及曝光不均等诸多干扰因素, 如何从背景中分割病斑成为植物病

害自动诊断与识别的关键问题。近年来, 由猫视觉皮层实验提出的脉冲耦合神经网络 (pulse coupled neural network, 简称 PCNN) 在图像去噪、边缘检测、图像增强、图像融合和图像识别等方面得到了广泛应用<sup>[1-8]</sup>。国内外文献对原 PCNN 模型进行了改进, 并将其应用于图像分割, 取得了较好效果。但对于目标和背景内容均复杂的植物病害图像, 目前的

收稿日期: 2011-03-01 修回日期: 2011-05-05

\* 国家自然科学基金资助项目 (60975007)

作者简介: 王守志, 博士生, 威海职业学院讲师, 主要从事智能化检测与监控研究, E-mail: wszokok@163.com

通讯作者: 何东健, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机在农业中的应用、生物数字图像处理与分析研究, E-mail: hdj168@nwsuaf.edu.cn

PCNN 图像分割方法难以获得较好的效果。本文在 CIE LUV 颜色空间中, 提出一种基于并行点火脉冲耦合网络 (parallelized firing PCNN, 简称 PFPCNN) 的玉米病害彩色图像非监督分割处理方法。首先利用前期研究的非线性矢量近似中值滤波算法对病害图像进行滤波平滑<sup>[9]</sup>; 然后以均匀色彩空间 CIE LUV 中归一化的  $L+U$  特征值为外部刺激输入, 以邻域内像素间几何距离与色度差的综合信息为 PCNN 耦合连接域权值, 以彩色颜色矢量的最小色差对比度为最佳分割结果判别准则, 用改进型并行 PCNN 对彩色病害图像进行分割。

## 1 并行 PCNN 模型

### 1.1 PCNN 基本原理

PCNN 模型是一种多参数神经网络模型, 其参数设置极其繁琐, 且对应用效果影响较大。为此, 马义德等提出了简化模型<sup>[10]</sup>, 其神经元结构如图 1 所示, 数学描述为

$$F_{ij}(n) = I_{ij} \quad (1)$$

$$L_{ij}^*(n) = \sum W_{ij} Y_{ij}(n-1) \quad (2)$$

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

$$Y_{ij}(n) = \begin{cases} 1 & (U_{ij}^*(n) > E_{ij}(n-1)) \\ 0 & (U_{ij}^*(n) \leq E_{ij}(n-1)) \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{ij}(n) = E_{ij}(n-1) - \gamma + v_e Y_{ij}(n) \quad (5)$$

式中  $I_{ij}$ ——外部输入激励, 即点  $(i, j)$  对应像素的特征值

$F_{ij}$ ——神经元输入项

$L_{ij}^*$ ——连接输入项  $U_{ij}^*$ ——内部活动项

$Y_{ij}$ ——脉冲输出  $E_{ij}$ ——动态阈值

$W_{ij}$ ——耦合连接域连接系数

$\gamma$ ——动态阈值衰减步长

$v_e$ ——动态阈值放大系数

$\beta$ ——内部活动项连接系数

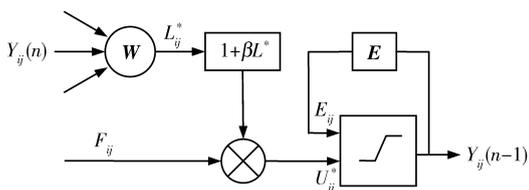


图 1 简化 PCNN 神经元模型

Fig. 1 Neuron model of simplified PCNN

在图像处理中, 由  $M \times N$  个神经元组成二维 PCNN 网络, 对应大小为  $M \times N$  图像的每个像素。神经元个体在接收外界激励  $I_{ij}$  的同时, 也可能受到来自邻近的耦合连接域影响。某神经元仅因输入激励而点火 (即  $Y_{ij} = 1$ ), 称为自然点火; 点火的神经元

通过  $L_{ij}^*$  的调制作用, 激活邻域神经元点火, 称为捕获点火; 而邻域神经元点火后又会激励周围的神经元点火, 从而在激活区中产生脉冲波向外传播, 称此脉冲波为自动波。实践中, 色彩相似空间相邻的像素趋向于同步点火, 利用该性质可实现图像分割。

### 1.2 并行 PCNN 原理

传统 PCNN 不能严格保证灰度相似、空间相邻的背景或目标像素同步点火, 较难获得理想的分割效果。为此, 彭真明<sup>[3]</sup>、张军英<sup>[4]</sup>等在图像分割、图像融合等方面提出了主辅 PCNN 并行网络结构, 虽能严格地实现同步点火, 但模型计算复杂度较高, 网络参数调整困难, 要求图像目标区域较亮, 适应面窄, 且对彩色图像分割效果较差。为降低网络参数设置对分割效果的敏感性, 提高分割效果及鲁棒性, 本文提出改进型并行 PCNN 模型。

并行 PCNN 模型由内、外两环组成, 内环选用无耦合连接 PCNN 模型, 即  $\beta = 0$ , 此时  $U_{ij}^* = I_{ij}$ , 仅发生自然点火; 外环选用耦合连接 PCNN 模型, 如图 2 所示。内外环设置不同的阈值  $E^n$  和  $E^m$ 。当模型开始迭代时, 内环 PCNN 启动, 并迭代一次。若内环存在自然点火, 令  $E^m = E^n$ , 进入外环 PCNN, 以自然点火的神经元为种子向外传播自动波, 特征值与相邻点火神经元相似的神经元被捕获, 每迭代一次, 外环的动态阈值  $E^m$  调整一次, 自动波向外传播, 如此迭代直到自动波充分传播。然后, 跳出外环进入内环, 启动内环的下次迭代。此模型保证了色彩相似空间相邻的像素严格同步激活点火。

为避免已点火神经元在后续的迭代过程中重复处理, 提高处理速度, 设置全局激活标记矩阵  $F$ , 并初始化为 0。在内外层循环中, 若某神经元点被激活点火 (自然点火或捕获点火), 该位置标记矩阵  $[F_{ij}]$  标记为 1, 且内外环 PCNN 后续迭代中对其不再处理。

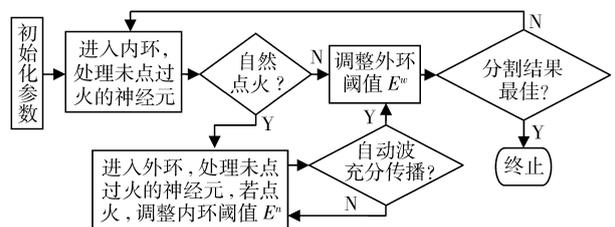


图 2 并行 PCNN 模型算法流程

Fig. 2 Flow chart of the parallelized firing PCNN model

#### 1.2.1 连接矩阵 $W$ 的确定

一般而言, 在大小为  $X \times X$  像素的邻域  $\Omega$  内, 某像素与中心像素色彩越相似、空间距离越近, 则对中心像素的影响也越大。但内部连接矩阵  $W$  基本靠经验设定。对不同的图像一般采用相同的设置, 未

充分利用特定图像的边缘信息和色彩信息。令在  $(i, j)$  处的神经元  $p_{ij}$  与其邻域中心  $(k, l)$  处的神经元  $p_{kl}$  的几何距离与色差度分别为  $S_{ij}$ 、 $C_{ij}$ ，综合考虑空间位置及色彩相似度对中心像素的影响，同时为平衡  $S_{ij}$ 、 $C_{ij}$  对连接矩阵  $\mathbf{W}$  的贡献度，神经元  $p_{ij}$  到  $p_{kl}$  连接系数计算公式为

$$w_{ijkl} = S'_{ij} \frac{1}{C_{ij}} \quad (C_{ij} \geq 1) \quad (6)$$

$$S'_{ij} = \frac{1}{C_f \parallel p_{ij} - p_{kl} \parallel} \quad (7)$$

式中  $S'_{ij}$ ——神经元  $p_{ij}$  到  $p_{kl}$  的几何距离倒数的归一化参数

$C_f$ ——归一化系数

### 1.2.2 动态阈值衰减方式

内环：为平等对待不同特征值范围内的目标像素，提高分割效果，内环采用线性衰减方式，如式(5)所示。

外环：目标区域或背景区域特征值变化缓慢，为保证自动波单步传递，避免过分割，参照文献[3]采用点火像素均值替代方法更新内环阈值

$$E_{ij}(n) = \begin{cases} \bar{F}_{\text{fire}} & (\bar{F}_{\text{fire}} < E_{ij}(n-1)) \\ E_{ij}(n-1) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \bar{F}_{\text{fire}} = \frac{1}{m} \sum_{p, q \in \text{fire}} F_{pq}(n) \quad (9)$$

式中 fire 表示邻域内已点火的神经元。

### 1.2.3 最佳分割结果判定

PCNN 迭代结果是一系列的图像分割二值序列，需从此序列中选取最佳分割结果。常用判定准则有最大香农熵准则、最大交叉熵准则、最小交叉熵准则、最大边缘数准则等。经实验比较，采用彩色颜色矢量的最小色差对比度确定最佳分割结果。

定义：假设图像分割为目标  $\Omega_o$  和背景  $\Omega_b$  两类区域，且各区域颜色均值分别为  $C_{mo}$  和  $C_{mb}$ ，则  $\Omega_o$  与  $\Omega_b$  的色差对比度  $C$  计算公式为

$$C = \frac{\parallel C_{mo} - C_{mb} \parallel}{\parallel C_{mo} + C_{mb} \parallel} \quad (10)$$

$$\parallel C_{mo} \pm C_{mb} \parallel =$$

$$\sqrt{(L_o \pm L_b)^2 + (U_o \pm U_b)^2 + (V_o \pm V_b)^2} \quad (11)$$

理论上，分割效果越好，其目标与背景区域内的像素色差越大，则类间像素色差越大，即当色差对比度最大时，其分割结果为总体最佳分割结果。

## 2 基于 PFPCNN 的玉米病害彩色图像分割

### 2.1 颜色空间与特征值的选择

玉米病害彩色图像存在成分繁杂、颜色分布不均、拍摄光照不均等诸多干扰因素。图像处理常用

的 RGB 颜色空间是一种非均匀颜色空间，不符合人的感知心理。在 RGB 颜色空间中，获得与视觉一致的分割效果比较困难。而 CIE LUV 是由 CIE(国际照明委员会)制定的一种与视觉一致的均匀色彩空间。Coquin D B、David R M 等在各自的研究中也发现 LUV 颜色空间在图像处理中优于 RGB 颜色空间<sup>[11-12]</sup>。结合前期研究情况选用 CIE LUV 颜色空间。

特征值的选择是图像分割的关键，对分割效果影响较大。信息熵是在平均意义上表征信息源总体特征，表示信息源整体的不确定程度，其值越大，信息源的不确定性越大，其信息量越大，分割效果越好。为计算方便，消除不同参数取值范围的影响，本文选择信息熵最大的亮度参数  $L$  与色度参数  $U$  之和的归一化值为特征值，即

$$I_{ij} = \frac{L_{ij} + U_{ij}}{\max(L + U)} \quad (12)$$

### 2.2 图像预处理

在植物病害彩色图像中，由于受到采集装置、环境等因素的影响，植物病害图像往往降质。为有效去除图像中的噪声，且较好地保护图像细节，改善图像分割效果，在实验对比的基础上，选用非线性矢量近似中值滤波算法进行预处理<sup>[9]</sup>。

### 2.3 图像分割

在 CIE LUV 颜色空间中，利用提出的算法对预处理后的彩色图像进行分割。分割过程中，PFPCNN 每次迭代激活的像素标记值保存在标记矩阵中，实现步骤如下：

(1) 初始化。

令  $\mathbf{I}_{M \times N}$  等于  $L + U$  参数值归一化的图像矩阵，初始设置  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $v_e$ 、 $E^w$  和  $E^n$ 。

(2) 启动内环 PCNN，迭代一次。

遍历扫描，更新  $U_{ij}^*$ 。若  $U_{ij}^* > E_{ij}^n$ ，则神经元  $p_{ij}$  自然点火。

(3) 判别是否启动外环 PCNN。

若存在自然点火，启动外环 PCNN，转到步骤(4)；否则更新  $E^n$ ，转到步骤(2)。

(4) 启动外环 PCNN，迭代直至自动波充分传递。

令  $E^w = E^n$ ；遍历扫描，更新外环参数  $L_{ij}^*$ 、 $U_{ij}^*$ ，若  $U_{ij}^* > E_{ij}^w$ ，则神经元  $p_{ij}$  捕获点火，并更新  $E^w$ ；一次迭代后，若存在捕获点火，继续遍历扫描，否则转到步骤(5)。

(5) 判别是否结束。

若分割结果最优，则结束；否则，令  $E^n = E^w$ ，然后更新  $E^n$ ，转到步骤(2)。

### 3 仿真实验与分析

#### 3.1 实验材料与实验系统

使用 Canon PowerShot S3IS 型数码相机, 在田间不同自然光照条件下, 采取自动曝光模式拍摄获取

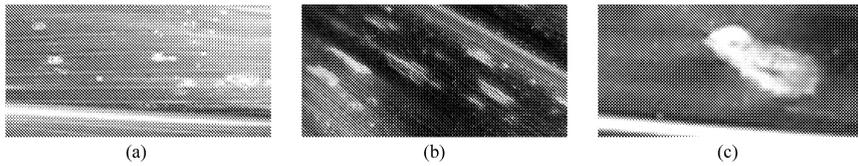


图 3 玉米叶部病害图像

Fig. 3 Color images of corn disease

(a) 弯孢霉叶斑病 (b) 小斑病 (c) 圆斑病

本文算法及 OTSU 等其他算法均在 Visual C++ 6.0 环境中编写实现, 实验设备选用配置为 P6000 CPU、2 GB 内存、Windows 7 的 Think Pad T410i 计算机。

#### 3.2 主要参数对分割结果的影响

为了研究并行 PCNN 内环阈值衰减步长  $\gamma$  和外环内部活动项连接系数  $\beta$  等主要参数对基于并行 PCNN 的病害图像分割结果影响, 设定 2 个实验, 测评 100 幅样本图像, 测评参数选择常用的区域一致性  $U_r$ 、色差对比度  $C$  及最小交叉熵  $H_{\min}$ 。

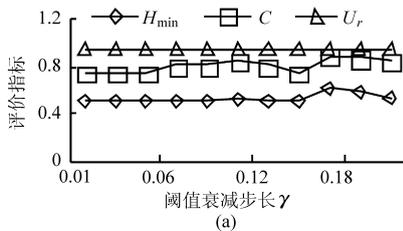


图 4 主要参数对分割结果的影响

Fig. 4 Influence of main parameters on the outcome of the division

(a) 阈值衰减步长  $\gamma$  (b) 连接系数  $\beta$

由实验数据可知, 当  $\gamma < 0.06$  时, 最小交叉熵  $H_{\min}$  等各评价参数在最优点处基本没有变化; 当  $\gamma > 0.06$  时, 色差对比度  $C$ 、最小交叉熵  $H_{\min}$  呈波动变化趋势, 部分图像存在过分割现象, 这是由于玉米叶部病害图像背景区域相对复杂, 在  $\gamma > 0.06$  时, 部分介于背景与目标之间且属于背景区域的像素因阈值衰减步长较大而错分割为目标区域, 从而造成目标与背景区域的平均色度出现无规律的此涨彼降。同时, 实验发现分割时间  $t$  随步长  $\gamma$  减小而增大。由此可见, 阈值衰减步长  $\gamma$  过大, 会发生过分割现象; 过小, 阈值下降缓慢, 分割时间较长。通常  $\gamma$  应在分割时间允许范围内尽可能取小值, 以获得较好的分割效果。对于玉米叶部病害图像来说, 阈值衰减步

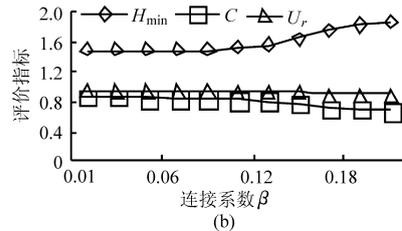
玉米不同生育期叶部病害图像, 以 JPEG 格式存储。然后筛选存在曝光不均、对比度低、目标区域复杂等干扰因素的, 感染了弯孢霉叶斑病、小斑病等病害的彩色图像 100 幅为实验样本, 并在 Photoshop 7.0 中裁剪为  $64 \times 128$ , 部分样本如图 3 所示。

实验 1: 内环阈值衰减步长  $\gamma$  与分割结果的关系。设定  $\beta = 0.05$ 、 $v_e = 1$ , 内环阈值衰减步长  $\gamma$  取 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、 $\dots$ 、0.20, 共 12 个水平。

实验 2: 外环内部活动项连接系数  $\beta$  与分割结果的关系。设定  $\gamma = 0.03$ 、 $v_e = 1$ , 外环内部活动项连接系数  $\beta$  取 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、 $\dots$ 、0.20, 共 12 个水平。

##### 3.2.1 内环阈值衰减步长 $\gamma$ 与分割结果的关系

阈值衰减步长  $\gamma$  与各评价参数的关系如图 4a 所示。



长一般应在 (0.01, 0.06) 区间取值。

##### 3.2.2 外环内部活动项连接系数与分割结果关系

外环的内部活动项连接系数  $\beta$  与分割结果的关系如图 4b 所示。曲线表明, 当  $\beta < 0.08$  时, 各评价参数在最优点处基本无变化; 当  $\beta > 0.08$  时, 最小交叉熵  $H_{\min}$  呈上升趋势, 色差对比度  $C$  呈下降趋势, 部分图像存在过分割现象, 如图 5 所示。这是由于连接系数  $\beta$  过大时, PCNN 的捕获效应增大, 部分空间相邻色差相近且属于背景区域的像素错分割为目标区域所致。由此可见, 连接系数  $\beta$  过大, 会发生过分割现象; 过小, 捕获效应减弱, 自动波传播不充分, 会发生欠分割现象。对于玉米叶部病害图像来说, 连接系数  $\beta$  一般在 (0.01, 0.08) 区间取值。

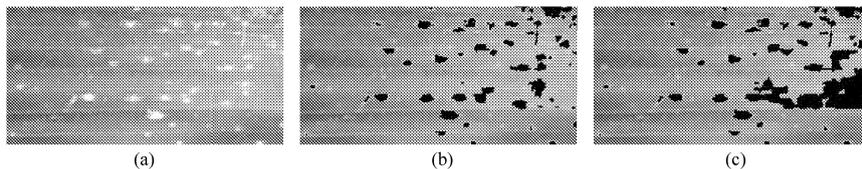


图5 弯孢霉叶斑病图像分割结果

Fig. 5 Segmentation results of corn curvularia leaf spot

(a) 原图像 (b)  $\beta = 0.08$  (c)  $\beta = 0.12$ 

与文献[3]相比,本文算法连接系数 $\beta$ 对目标与背景区域的差异性要求低,其适应面宽,实验结果恰好证实了这一点。这是因为本文算法耦合连接域连接系数 $W_{ij}$ 兼顾了像素间的空间位置与色彩相似度影响,降低了内部活动项的连接系数 $\beta$ 对网络应用效果的影响敏感度,即消弱了 $\beta$ 对网络的耦合连接影响。

### 3.3 不同算法分割结果的对比分析

以3.1节中的实验样本为对比测试样本,以OTSU算法、文献[3]算法为参照与本文算法进行对

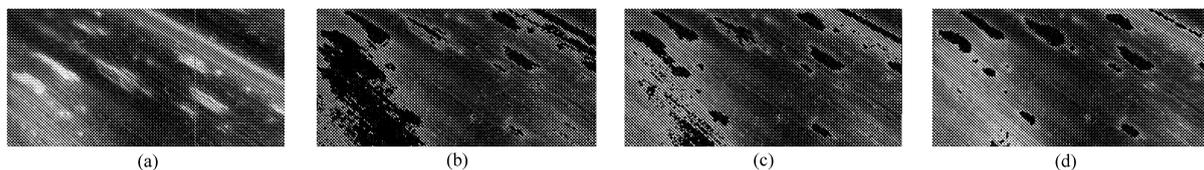


图6 小斑病图像分割结果

Fig. 6 Segmentation results of corn southern leaf blight

(a) 原图像 (b) OTSU算法 (c) 文献[3]算法 (d) 本文算法

由分割效果评价准则实验测试数据看,本文算法在各分割效果标准上均优于OTSU算法与文献[3]算法,但在分割速度上,本文算法优于文献[3]算法,次于OTSU算法,如表1所示。这是由于本文算法为保证不同像素等级的病斑像素都被捕获,采取了相对较小的内环阈值衰减步长,PCNN网络需对图像进行多次遍历扫描所致。

## 4 结论

(1)以均匀色彩空间LUV中归一化的 $L+U$ 特征值为外部激励输入,以邻域像素间几何距离与色度差的综合信息为PCNN耦合连接域权值,改进了并行PCNN模型。实验证明,该模型克服了曝光不均、对比度低等因素影响,对不同生长期的各类玉米病害彩色图像分割效果较好。

比分析实验。本文算法实验参数 $\beta = 0.05$ ,  $\gamma = 0.03$ ,  $v_e = 1$ 。

从分割视觉效果上看,OTSU算法存在过分割现象,文献[3]算法存在欠分割现象,本文算法综合分割结果较理想,但对于空间距离较近、色差相似的病斑易误分割为同一病斑,如图6所示。对多处曝光不均、目标区域复杂的小斑病图像分割,OTSU和文献[3]算法都存在过分割现象,而本文算法既考虑了像素的空间位置,又兼顾了色差信息,克服了曝光不均、对比度低等因素,其分割结果较理想。

表1 不同算法的性能评价

Tab. 1 Performance evaluation of different algorithms

算法	$U_r$	$C$	$H_{\min}$	$T/s$
OTSU	0.92	0.70	0.16	0.06
文献[3]	0.86	0.73	0.22	0.18
本文	0.94	0.76	0.15	0.15

(2)对于玉米叶部病害图像分割,阈值衰减步长 $\gamma$ 与连接系数 $\beta$ 分别在 $(0.01, 0.06)$ 、 $(0.01, 0.08)$ 区间取值,可获得较好的分割效果。

(3)PFPCNN算法极大降低了内部活动项的连接系数 $\beta$ 对网络应用效果的影响敏感度,减少了 $\beta$ 参数的设置复杂度。实验证明,同一模型参数对同类型彩色图像具有较好的适应度,但部分图像分割时间较长。

## 参 考 文 献

- 魏伟一,李战明.基于改进PCNN和互信息熵的自动图像分割[J].计算机工程,2010,36(13):199~200.  
Wei Weiyi, Li Zhanming. Automated image segmentation based on modified PCNN and mutual information entropy [J]. Computer Engineering, 2010, 36 (13): 199 ~ 200. (in Chinese)
- 薛锦树,周冬明,聂仁灿,等.基于Unit-Linking PCNN和HSI空间的彩色图像分割方法[J].云南大学学报:自然科学

- 版, 2010, 32(3):288 ~ 293.
- Xue Jinshu, Zhou Dongming, Nie Rencan, et al. Color image segmentation based on Unit-Linking PCNN and HSI space [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2010, 32(3): 288 ~ 293. (in Chinese)
- 3 彭真明, 蒋彪, 肖峻, 等. 基于并行点火 PCNN 模型的图像分割新方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1 169 ~ 1 172. Peng Zhenming, Jiang Biao, Xiao Jun, et al. A novel method of image segmentation based on parallelized firing PCNN [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1 169 ~ 1 172. (in Chinese)
- 4 张军英, 梁军利. 基于脉冲耦合神经网络的图像融合[J]. 计算机仿真, 2004, 21(4): 102 ~ 104. Zhang Junying, Liang Junli. Image fusion based on pulse-coupled neural networks [J]. Computer Simulation, 2004, 21(4): 102 ~ 104. (in Chinese)
- 5 Huang W, Jing Z L. Multi-focus image fusion using pulse coupled neural network [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(9): 1 123 ~ 1 132.
- 6 Zhang J Y, Fan X J, Dong J Y, et al. Image segmentation based on modified pulse-coupled neural networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 16 (1): 119 ~ 122.
- 7 周亮, 刘云. 基于改进的 PCNN 的彩色图像边缘检测算法[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 447 ~ 450. Zhou Liang, Liu Yun. Approach for color image edge detection using modified PCNN [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 28 (5): 447 ~ 450. (in Chinese)
- 8 王巍, 黎明, 刘高航, 等. 基于脉冲耦合神经网络的彩色图像滤波新方法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 24(14): 3 413 ~ 3 415. Wang Wei, Li Ming, Liu Gaohang, et al. New color image filtering algorithm based on PCNN [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 24(14): 3 413 ~ 3 415. (in Chinese)
- 9 韩金玉, 王守志. 基于噪声特征和矢量中值滤波的彩色图像去噪算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2 418 ~ 2 419. Han Jinyu, Wang Shouzhi. Color image de-noising based on noise characteristic and vector median filtering [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(9): 2 418 ~ 2 419. (in Chinese)
- 10 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 ~ 726. Ma Yide, Qi Chunliang. Study of automated PCNN system based on genetic algorithm [J], Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 722 ~ 726. (in Chinese)
- 11 Coquin D B, Ionescu P B. Dissimilarity measures in color spaces [C] // Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, 2002, 1: 612 ~ 615.
- 12 David R M, Charless C F, Jitendra M. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26 (5): 530 ~ 548.
- 13 李永峰, 丁润涛, 国澄明. 一种彩色图像滤波的改进矢量中值滤波算法[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(3): 361 ~ 364. Li Yongfeng, Ding Runtao, Guo Chengming. A modified vector median algorithm for color image filtering [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(3): 361 ~ 364. (in Chinese)

---

(上接第 157 页)

- 6 龚声蓉, 刘纯平, 王强, 等. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- 7 张弘, 曹晓光, 谢凤英, 等. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 8 谢忠红, 姬长英, 郭小清, 等. 一种基于改进 Hough 变换的类圆苹果目标检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 157 ~ 162. Xie Zhonghong, Ji Changying, Guo Xiaoqing, et al. An object detection method for quasi-circular fruits based on improved Hough transform [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 157 ~ 162. (in Chinese)
- 9 朱煜, 江林佳, 肖玉玲. 材料图像目标粘连点定位与分割方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(1): 110 ~ 113. Zhu Yu, Jiang Linjia, Xiao Yuling. Concave spots localization and region segmentation in fibrous material image based on chain codes [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2008, 32 (1): 110 ~ 113. (in Chinese)