

一种基于有界变分的树叶锯齿特征提取算法研究

李德志 成孝刚 汪涛 吕泓君 李海波

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003)

摘要: 树叶锯齿特征的提取对于研究植物内部的基因关系至关重要。为了克服现有算法的局限性, 本文提出一种基于有界变分的树叶锯齿特征提取算法, 以有效提取树叶锯齿的数量、深度和宽度等多维特征, 从而为后续的基因分析提供重要依据。首先对树叶图像进行预处理以得到其轮廓坐标; 然后计算整个叶片相邻像素点之间的斜率变分, 以实现初步的角点检索; 再通过估算锯齿深度进行误差补偿, 从而得到锯齿角点及其凹点, 最终估算出锯齿的多维特征。本文利用瑞典的白杨树叶(12 000片)对所提算法进行验证。大数据验证表明, 本文算法能够批量提取树叶锯齿个数、宽度和深度等特征, 其中锯齿数量的识别准确度达到86.3%。

关键词: 有界变分; 多维参量; 计算机视觉; 树叶锯齿; 基因

中图分类号: TP391

文献标志码: A

A Novel Feature Extraction Algorithm for Leaf Serration Based on Bounded Variation

Li Deizhi, Cheng Xiaogang, Wang Tao, Lü Hongjun, Li Haibo

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China)

Abstract: The feature extraction of leaf serration plays a crucial role in studying the plant gene relationship. To overcome the drawbacks of current algorithms, a novel leaf feature extraction algorithm based on bounded variation is proposed. Thereby, multi-parameters such as serration numbers, serration depth, and serration width can be obtained. These parameters provide an important basis for the subsequent gene analysis. Firstly, the boundary coordinates of a leaf are obtained based on image preprocessing. Secondly, we calculate the bounded variation between the adjacent pixels of the boundary. As such the initial values of the corner points can be obtained. Thirdly, the values of serration depth are computed for error compensation, and the coordinates of corner points (top and bottom) are obtained. Finally, all kinds of features, including serration numbers, serration depth, and serration width, are calculated. A big aspen dataset (12 000 pieces) collected from real world are used for algorithm validation. The results show that the estimation accuracy of serration numbers achieves 86.3% and all the parameters shown above can be batch extracted.

Key words: bounded variation; multi-dimensional parameters; computer vision; leaf serration; gene

引言

植物的叶片形态各异,有扇形、椭圆形、掌形、披针形等,提取树叶表面形态特征,尤其是锯齿特征,有助于构建树叶表面特征与其基因之间的关系,对于植物育种、抗病虫具有重大意义。

目前已有诸多方法提取植物叶片边缘轮廓和锯齿的特征。国外对于植物叶片提取特征的研究起步较早,提取的参量也相对全面^[1]。Belongie 等人^[2]在 2007 年提出了形状上下文描述方法,利用直方图对目标图像的形状特征进行描述,很好地反映了轮廓线上采样点的分布。Mouine 等人^[3]在 2013 年提出三角形面积法、三角形边长表示法、三角形角度法以及三角形边长角度法进行曲率尺度空间的描述。Wang 等人^[4]采用拱形高度即轮廓线上一点到其对应的弦的垂直距离来作为特征描述。国内,王晓洁等人^[5]设计了基于凸包的植物叶锯齿与叶裂位置识别方法,并且对多种植物叶图像进行了测试。董本志等人^[6]采用基于 Freeman 的拐角点检测方法排除大部分伪拐点,并结合基于链码差的边界凹凸性判别方法进一步排除伪拐点,同时标注出叶片的顶点。尽管上述方法对植物叶片锯齿边缘特征的识别有了改善,但是仍然存在识别锯齿个数准确度较低、提取的特征参数不够多、对大数据量叶片泛化能力差、无法批量提取锯齿特征等局限性。

针对上述问题,本文采用了基于有界变分的方法检测叶片的锯齿数量等各种参量,引入有界变分思想,对锯齿深度进行分析,算法流程如图 1 所示。利用海量数据进行算法训练,验证了算法的有效性。

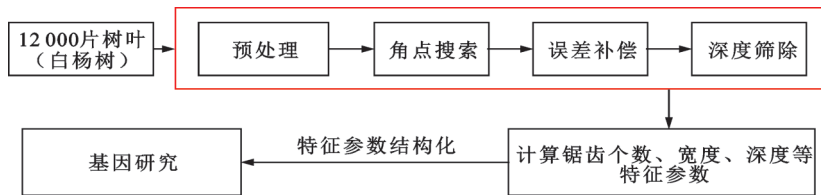


图 1 树叶锯齿特征提取研究流程

Fig.1 Research process of feature extraction of leaf serration

1 基于有界变分的算法

1.1 理论基础

本文算法所处理的数据为树叶扫描图像,拟采用有界变分构建树叶锯齿特征提取方法。Rudin 等人先后构建并完善了关于图像处理的变分模型^[7-9],该模型首先假设噪声为高斯白噪声,且均值方差为零。具体图像的变分模型可表述成^[10]

$$BV(u) = \int_{\Omega} |u_x| dx \quad (1)$$

式中 $|\Omega|$ 表示图像区域 Ω 的面积。按照有限差商来解释 u_x , 则有

$$u_x = \frac{u(x+h) - u(x)}{h} \quad (2)$$

可以看出, $BV(u)$ 具有如下性质: 若 $u \in BV([x_1, x_2])$, 且在 $[x_1, x_2]$ 内单调, $u(x_1) = u_1, u(x_2) = u_2$, 则无论函数 u 的具体形式如何, 只要 u 在边界点 x_1, x_2 内可导, 总有^[10]

$$BV(u) = |u_2 - u_1| \quad (3)$$

1.2 基于有界变分的锯齿特征提取算法

式(3)的本质是求变差。在此基础上,本文所提出的树叶锯齿特征提取算法包含图像预处理(轮廓坐标提取)、搜索锯齿顶点、搜索锯齿凹点、计算锯齿个数、宽度以及深度等环节,具体阐述如下。

1.2.1 轮廓坐标提取

本文在提取锯齿特征之前先对树叶图像进行基本的预处理,获得树叶边缘轮廓坐标。轮廓坐标提取的准确与否,会直接影响到锯齿特征提取的好坏,因此这一步至关重要。首先对彩色图片进行灰度化处理,消除灰度高频噪声;然后将灰度图像二值化,并填充图像中的空洞等不完全部分,获取单个连通体,指定起始点坐标与跟踪方向,较为准确地提取叶片的轮廓坐标;最后,沿着顺时针方向将轮廓坐标分为4个部分,分别存入4个矩阵,供后续分段处理。设 N 为边缘坐标矩阵, $b_{_top}, b_{_right}, b_{_bottom}, b_{_left}$ 分别为边缘上顶点、右顶点、下顶点、左顶点的坐标, (i, j) 为边缘像素坐标,则 $N_1[i, j] = \{(i, j) | i \geq b_{_top}[1, 1] \& j < b_{_right}[1, 2]\}$,类似依次将坐标分别保存入 N_1, N_2, N_3, N_4 中。图2(a)显示了图像原始轮廓,而图2(b)显示了图像轮廓的4个部分。

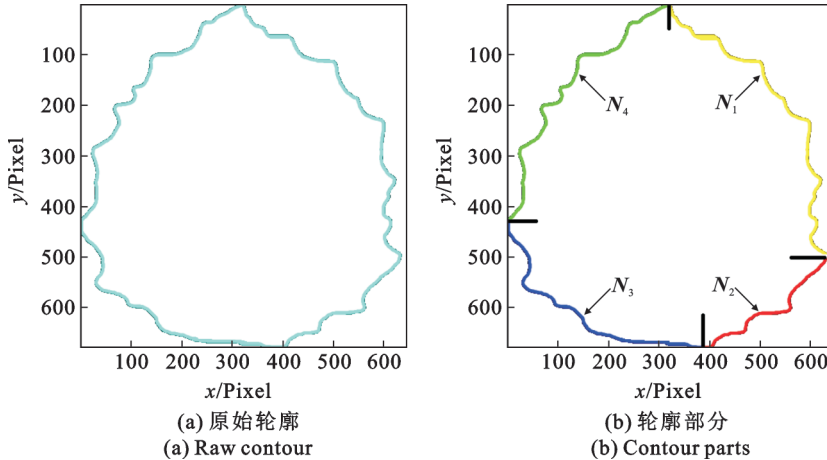


图2 树叶轮廓提取

Fig.2 Leaf contour extraction

1.2.2 基于变分的锯齿顶点提取

本文中以轮廓第1区域为例(N_1),通过多重筛选搜索角点,具体包含斜率搜索、误差补偿和深度筛选3个步骤。

(1) 斜率搜索

基于凸包生成算法^[11],本文以斜率代替角度计算,作为角点搜索的第一步。

① 根据式(4)计算出目标轮廓上从 $b_{_top}$ 到 $b_{_right}$ 之间各点到 $b_{_top}$ 点的斜率为

$$k = \frac{N_1[:, 2] - b_{_top}[1, 2]}{N_1[:, 1] - b_{_top}[1, 1]} \quad (4)$$

② 选出上述计算出的斜率中最小值的索引,确定位置为

$$idx_s = \operatorname{argmin}(k) \quad (5)$$

③ 以上面计算出的首个位置作为起点,重复①②操作,直到到达 $b_{_right}$,到此为止进行了第一轮搜索,将位置索引保存到 I_1 。

由于锯齿的多样性,通过斜率变化搜索出的顶点并不能覆盖所有实际的顶点,有一定的缺失

(2) 误差补偿

观察叶片图像锯齿,可以看到一般锯齿深度都存在大小变化。基于式(3),本文假定锯齿的深度信号在局部邻域内单调变化,利用求解锯齿深度变差,对第(1)步斜率搜索进行误差补偿。具体操作中,计算点到由锯齿顶点构成直线的距离变化来进行第二轮补偿选择。假设 I_1 中第一个索引为 a_1 ,第二个索引为 a_2 ,从 a_1 到 a_2 之间的区域为 N_{11} ,以 N_{11} 为例描述详细过程。

① 根据式(6,7)计算出由 a_1, a_2 构成的直线方程。

$$k = \frac{I_1[a_2, 2] - I_1[a_1, 2]}{I_1[a_2, 1] - I_1[a_1, 1]} \quad (6)$$

$$y = kx + b \quad (7)$$

② 根据式(8)计算出 N_{11} 中所有坐标点到由 a_1, a_2 构成的直线的距离,从中筛选距离从大到小,再从小到大的点,作为新的顶点。

$$D[i] = \frac{|k \times N_{11}[i, 1] + b - N_{11}[i, 2]|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (8)$$

③ 对 N_1 中的其他区域重复步骤①,直到 N_1 区域中的顶点扫描完毕,到此为止进行了第二轮搜索,将新筛选出的顶点位置索引联合 I_1 中的位置索引一起保存到 I_2 中。

虽然通过斜率搜索和误差补偿可以搜索出大量的顶点,但是由于轮廓上锯齿凹凸程度不同,其中很多顶点位于实际顶点的内部,并不需要,有一定的冗余。

(3) 深度剔除

叶片图像中有很多轻微凹凸的曲面,并不能在实际意义上被称为锯齿,但是由于上述两个方法的涵盖性强,达到了一定的“过拟合”。故这里采用了与式(8)类似计算距离的方法,计算出 I_2 中所有索引坐标到 I_1 中顶点索引坐标所构成直线的距离,选取阈值,筛除不符合的顶点,最终将符合的顶点保存到 I_3 中,如式(9)所示。

$$I_3[i] = \{j | D[j] \geq 0.8 \times \max(D[:])\} \quad j \in I_2 \quad (9)$$

1.2.3 提取锯齿凹点

I_3 中所有顶点即本文最终提取出的锯齿顶点。将其中所有两两顶点连线,求出方程。通过距离公式求出锯齿顶点之间所有的坐标点到方程的距离,取其中最大距离的坐标点作为当前锯齿的凹点,如式(10)所示。

$$\text{idx}_c = \text{argmax}(D) \quad (10)$$

1.2.4 计算特征参数

上述算法提取锯齿凹点时,计算出的对应最大距离即为当前锯齿的深度, I_3 中相邻锯齿顶点之间的距离即为锯齿的宽度,而且提取出的锯齿凹点个数就是锯齿的个数。论文算法的详细步骤如表1所示。

表1 本文算法详细步骤

Tab. 1 Detailed process of proposed algorithm

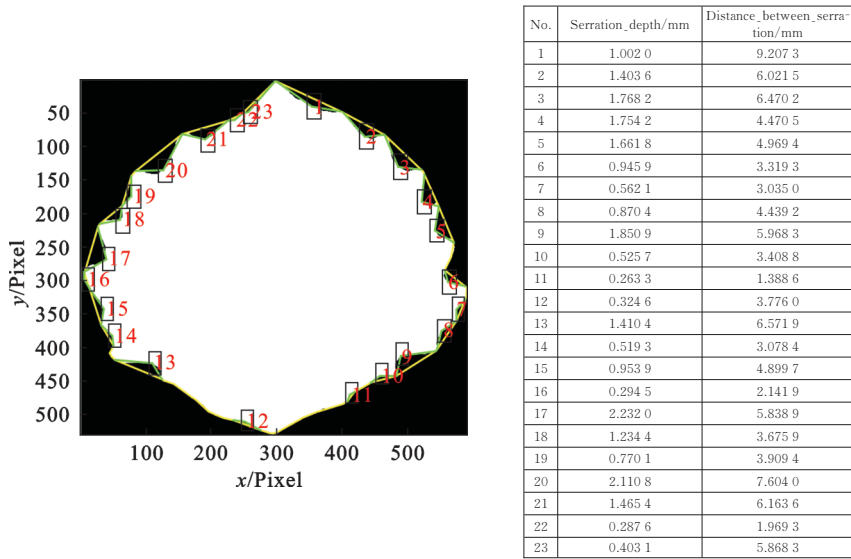
算法: 基于偏微分的树叶锯齿特征提取算法研究
输入: 1 200 棵白杨树 (12 000 片树叶)。
输出: 单个树叶锯齿个数、深度、宽度。
初始化: 锯齿检测起点值。
算法步骤:
1. 预处理: 搜索树叶边界
(1) 滤除噪声并二值化;
(2) 滤波获得单个连通体;
(3) 获取树叶边界坐标。
2. 角点搜索(式(4, 5))
(1) 比较边界点与初始化角点的斜率变化情况;
(2) 搜索 $k_1 \times k_2 < 0$ 点。
3. 误差补偿(式(6—8))
(1) 在所有角点之间, 比较锯齿深度值;
(2) 寻找 $y_{n+1} = y_n, n \leq 6$ 。
4. 深度筛除(式(9))
计算经2,3步所得角点的锯齿深度值, 删除过小的角点。

2 计算机验证及分析

本文利用瑞典的白杨树叶对所提算法进行验证,共计1200棵白杨树,每棵树采集10片树叶,共计12000张。验证算法的计算机硬件为:CPU Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ,内存8 GB,所有软件平台为Python和Matlab。

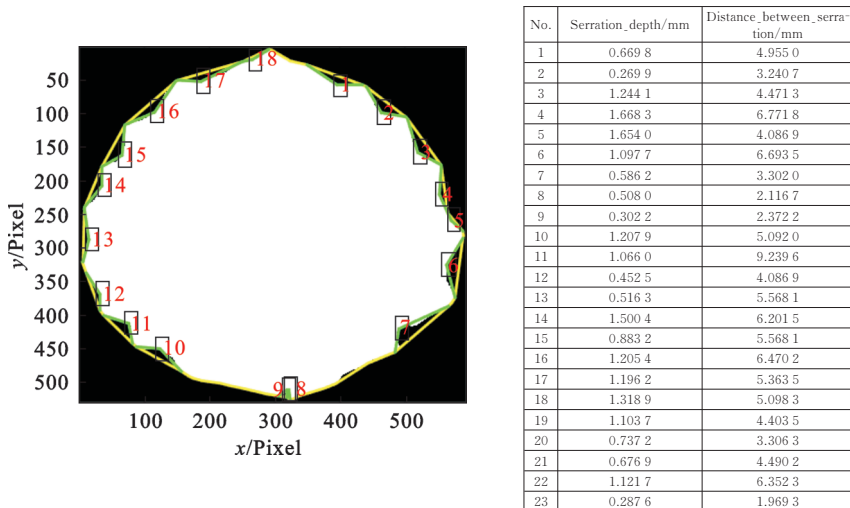
图3为部分树叶测试结果。左列图像为在每个二值化图像轮廓上用外部线条连接识别的锯齿顶点,然后通过内部线条两两连接顶点与凹点,形成三角,最后用数字标注出锯齿的个数。右列则对应左边叶片图像的锯齿参数计算结果,包括锯齿深度及锯齿宽度。

由图3可以看出,4张叶片图像均经过初步角点搜索、误差补偿及深度剔除等多轮步骤确定锯齿位置,较为准确地标注出锯齿顶点及凹点。



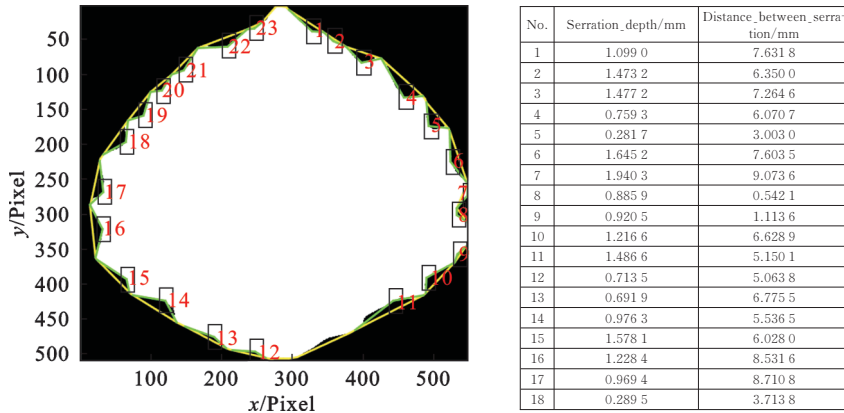
(a)叶子1的锯齿图及其锯齿参数表

(a)Serration result of Leaf 1 and its serration parameters



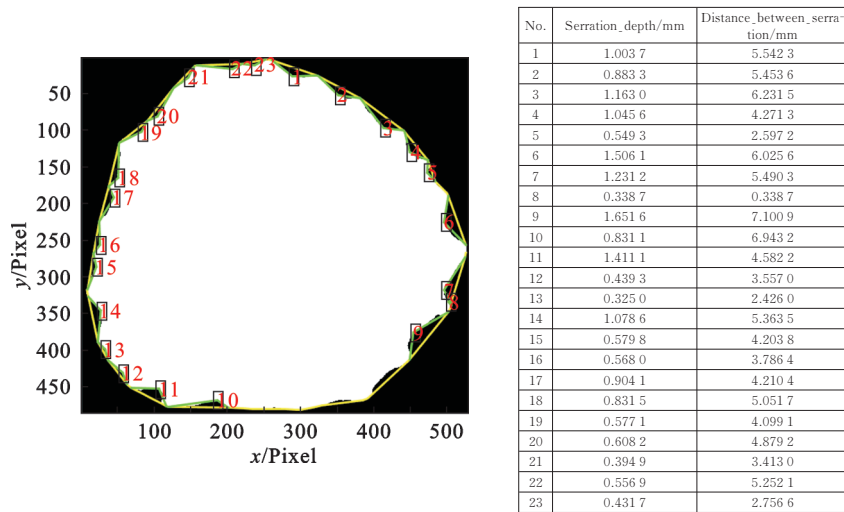
(b)叶子2的锯齿图及其锯齿参数表

(b)Serration result of Leaf 2 and its serration parameters



(c)叶子3的锯齿图及其锯齿参数表

(c)Serration result of Leaf 3 and its serration parameters



(d)叶子4的锯齿图及其锯齿参数表

(d)Serration result of Leaf 4 and its serration parameters

图3 数据验证结果

Fig.3 Data verification result

图4显示了300张叶片样本的锯齿个数检测结果,横轴表示叶片的个数,纵轴表示对应的检测个数。蓝色线表示了算法预测的个数,黄色线表示了实际观测的个数。据测试结果计算,识别锯齿个数的准确率达86.3%。在此基础上,能够准确计算出锯齿宽度、深度等参数。需要说明的是,树叶底部较为平滑时,一般不被视为锯齿。

3 结束语

本文提出了一种基于有界变分的树叶锯齿特征提取算法,在提取树叶轮廓坐标的基础上,计算叶

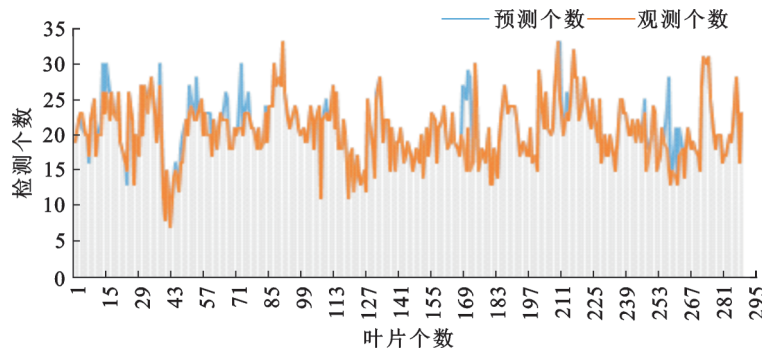


图4 锯齿个数检测结果

Fig.4 Detection result of serration numbers

片相邻像素点之间的斜率变分,搜索锯齿顶点及凹点,最后计算树叶锯齿的数量、深度和宽度等多维特征。经过测试,识别锯齿个数的准确率达86.3%,同时能够在此基础上计算出锯齿深度、宽度等参数,为后续的基因分析提供依据,具有一定的参考价值。

但是,本文算法还存在一定的局限性,检测还存在一定误差。究其原因,一方面是预处理不够完善,仍有噪声点出现,不能特别准确地提取轮廓坐标;另一方面可能是多轮筛选提取的过程中,筛选的顺序或次数有问题。后续将针对这些问题进行改进。同时,深度学习数据特征提取方面显现出良好的性能。利用深度学习对树叶特征作分析,并与本文算法比较,将为本文后续工作。

参考文献:

- [1] 洪艳. 基于叶片轮廓与角点的植物叶片识别研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
Hong Yan. Plant leaves recognition based on leaf contour and corner points[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2015.
- [2] Etehadtavakol M, Yin-Kwee N E, Gheissari N. Using shape contexts method for registration of contra lateral breasts in thermal images[J]. World Journal of Clinical Oncology, 2014, 5(5):1055-1059.
- [3] Mouine S, Yahiaoui I, Verroust-Blondet A. A shape-based approach for leaf classification using multiscale triangular representation[C]//Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Multimedia Retrieval. Dallas, USA: ACM, 2013:127-134.
- [4] Wang Bin, Brown D, Gao Yongsheng, et al. MARCH: Multiscale-arch-height description for mobile retrieval of leaf images[J]. Information Sciences, 2015(302):132-148.
- [5] 王晓洁, 于浩杰, 郑小东. 凸包在植物叶锯齿与叶裂位置识别中的应用[J]. 农机化研究, 2013, 35(3):214-216.
Wang Xiaojie, Yu Haojie, Zheng Xiaodong. Application of convex hull in location discrimination of leaf teeth and leaf lobes [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(3):214-216.
- [6] 董本志, 康欣, 任洪娥. 植物叶片轮廓特征提取方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8):143-147.
Dong Benzhi, Kang Xin, Ren Hong'e. Plant leaves contour feature extraction method[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(8):143-147.
- [7] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Phys D Nonlinear Phenom, 1992, 60: 259-268.
- [8] Rudin L I, Osher S. Total variation based image restoration with free local constraints[C]//Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 1994). Austin, TX, USA: IEEE, 1994: 31-35.

- [9] Osher S, Burger M, Goldfarb D, et al. An iterative regularization method for total variation-based image restoration[J]. *Multiscale Model Simul*, 2005, 4: 460-489.
- [10] 王大凯, 侯榆青, 彭进业. 图像处理的偏微分方程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:144-149.
- [11] 王晓洁, 郑小东. 基于双向极角的植物叶凸包生成算法[J]. *农机化研究*, 2009, 31(10):173-175.
- Wang Xiaojie, Zheng Xiaodong. Algorithm of constructing convex hull for plant leaf based on bidirectional polar angle[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(10):173-175.

作者简介:

李德志(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 计算机视觉与机器学习, E-mail: de-zhili_ny@163.com。



成孝刚(1980-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 人工智能 (Vision++)。



汪涛(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 计算机视觉与机器学习。



吕泓君(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 计算机视觉与机器学习。



李海波(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 新媒体技术。

(编辑: 张黄群)