

无芒隐子草叶片卷曲度和厚度测量方法

张文霞¹ 王春光² 王海超² 殷晓飞³ 宗哲英²

(1. 鄂尔多斯应用技术学院信息工程系, 鄂尔多斯 017000; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;
3. 呼和浩特职业学院机电工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 针对叶片卷曲度和厚度交互式测量方式费时、费力、误差大,传统图像处理算法普适性不高等问题,以无芒隐子草叶片为研究对象,采用基于 Graham 算法的最小外接矩形法实现叶片卷曲度的测量,采用矢量积法和角点检测相结合的凹凸点检测算法实现叶片厚度的测量。首先,通过石蜡制片获取无芒隐子草叶切片,利用显微镜连接计算机获取切片图像;然后,采用红色灰度化方法结合阈值分割将切片图像的目标和背景分离;最后,根据叶片卷曲度和厚度的实际测量方式,采用 Graham 算法通过求取目标区域的最小外接矩形实现叶片卷曲度的测量,将矢量积法和角点检测相结合检测目标区域的凹凸点,通过凹点与凹点、凸点与凸点匹配实现叶片厚度的测量。选取 30 幅无芒隐子草叶切片图像为样本进行了试验,结果显示,采用本文提出的红色灰度化方法和分量法、最大值法、平均法、加权平均法对图像进行灰度化处理后,图像信息熵分别为 6.428 0、6.361 2、5.667 9、5.934 8、6.052 6,图像平均梯度分别为 0.078 5、0.024 2、0.015 8、0.009 3、0.010 4,图像对比度分别为 0.264 1、0.113 0、0.057 4、0.070 3、0.078 4,说明本文方法能更好地保持图像的边缘、细节等信息,图像清晰度更高。进行自动阈值分割后,分割的平均误检率为 0.75%,平均漏检率为 3.49%,平均整体分割精度达到 98.14%。在有效分割目标和背景的基础上,对叶片卷曲度和厚度进行测量,并与交互式测量结果进行相比,结果表明,采用本文方法对叶片卷曲度和厚度的测量值与交互式测量值的平均相对误差分别为 0.96% 和 3.69%,测量速度分别提高了约 10 倍和 37 倍。

关键词: 无芒隐子草; 切片图像; 灰度化方法; 叶片卷曲度; 叶片厚度; 凹凸点检测

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0184-08

OSID:



Measurement Method of Leaf Rolling Index and Thickness of *Cleistogenes songorica*

ZHANG Wenxia¹ WANG Chunguang² WANG Haichao² YIN Xiaofei³ ZONG Zheyang²

(1. Department of Information Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017000, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Huhhot Vocational College, Huhhot 010051, China)

Abstract: The leaf rolling index and thickness are important indexes of plant drought resistance. However, existing measuring methods of these two indicators are wasteful, inefficient and weak universality. To solve this problem, the minimum external rectangle method based on Graham algorithm was proposed to extract the value of leaf rolling index and the concave and convex point detection algorithm combined the corner detection was proposed to measure the leaf thickness. The algorithm used in the article had the following steps: firstly, the permanent sides were obtained by paraffin sectioning technique, and then connected the microscope and computer to obtain slice images. Secondly, a red grayscale method was proposed for the *Cleistogenes songorica* leaf anatomical structure image to enhance contrast and details, according to the color difference of red and blue between the foreground and the background. Then through subjective judgment (observing the change of processed image, and comparing the changes to find out which method was the best one), it was found out that images processed by

收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-10-08

基金项目: 教育部“云数融合科教创新”基金项目(2017A10019)、内蒙古自治区博士研究生科研创新项目(B20151012902Z)、内蒙古自治区高等学校研究项目(NJZY070、NJZY19288)和鄂尔多斯应用技术学院一般项目(KYYB2017004)

作者简介: 张文霞(1982—),女,副教授,博士,主要从事图像处理及模式识别研究,E-mail: zhangwenxia100@163.com

通信作者: 王春光(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事图像与数字化研究,E-mail: jdwgcg@imau.edu.cn

grayscale methods had the shortcoming of details blurred and proposed method showed better performance in improving the quality of image and the details of the images than the other methods. Also by evaluation functions: average gradient (AG), contrast (C) and information entropy (E) were used for objectively evaluated the method used and the traditional ones. The average value of AG, C and E was got by processing 30 test images, and it turned out that the values of the method proposed was better than the other methods. On this basis, eliminated noise using morphological operation and using linear filtering to eliminate serrated boundaries and eventually segmented background and objective by the maximum inter-class variance (Otsu). Through subjective judgment, it was found out that the segmented target area basically coincided with the original boundary of the target. Also by evaluation functions: false positive rate (FPR), false negative rate (FNR), and global segmentation accuracy (GSA) were used for objectively evaluating the method. The average value of FPR, FNR and GSA was got by processing 30 test images were 0.75%, 3.49% and 98.14%, respectively. Finally, according to the actual measurement mode of leaf rolling index, the longest distance between the two points on the *Cleistogenes songorica* leaf anatomical structure image was measured, the minimum external rectangle method based on Graham algorithm was used to extract the value of leaf rolling index of the objective. The measurement was compared with its mean value of interactive measurement by ToupTek Toupview software, the average relative error of 30 test images was 0.96% and the average time consumed was 4.87 s by the measurement proposed, the speed was improved by 11 times. According to the actual measurement of leaf thickness was to measure the distance between the concave points and the concave points on the left and right boundary of the *Cleistogenes songorica* leaf anatomical structure image, it was also the distance between the convex points and the convex points, the proposed concave and convex point detection algorithm combined the corner detection algorithm and vector product method to eliminate the useless apexes to obtain the concave and convex points in accordance with the actual measurement. Then, the leaf thickness value was obtained by concave points matching and convex points matching. The measurement was compared with its mean value of interactive measurement by ToupTek Toupview software, the average relative error of 30 test images was 3.69% and the average time consumed was 4.92 s by the measurement proposed, the speed was improved by 38 times. In conclusion, the algorithm was more suitable for background segmentation and object measurement of *Cleistogenes songorica* leaf slices and can also provide a reference for other plant leaf slice images.

Key words: *Cleistogenes songorica*; slices images; grayscale method; leaf rolling index; leaf thickness; concave and convex point detection

0 引言

植物叶片是植物进行光合作用的主要场所,其发育状况直接影响植物的生长^[1]。植物叶片卷曲度和厚度是反映植物抗旱性的重要指标^[2-3],深入研究这两个参数对揭示植物的生长状况、研究抗旱机制、选育耐旱植物以及实现环境控制具有重要的意义。

叶片几何参数测量方法主要分为直接法和间接法。直接法通过破坏性取样后进行测量,常见的有九宫格法、称重法、求积仪法等^[4-5],该类方法主要依靠人工操作,测量精度低且费时费力,不能进行大规模数据测量;间接法主要利用相关仪器测定参数值^[6],该类方法设备价格昂贵、操作繁琐、维修成本高^[7],且不适合大规模数据测量。随着计算机技术的发展,近年来通过图像处理方式分析和测量植物叶片几何参数的方法备受关注^[8-13]。此类方法在确保测量精度的前提下,提高了测量速度,且有助于

批量测量。目前,多数学者研究的图像测量方法仅针对平整型植物叶片进行测量,且针对叶面积的测量方法研究较多,而专门针对植物叶片厚度和卷曲度测量的研究却鲜见报道。

本文以无芒隐子草叶片为研究对象,通过石蜡制片获取无芒隐子草叶切片图像,采用红色灰度化方法结合阈值分割将目标和背景分离,在准确分割的基础上,提出采用基于 Graham 算法的最小外接矩形法实现叶片卷曲度的测量,采用矢量积法和角点检测相结合的凹凸点检测算法实现叶片厚度的测量。

1 材料与方法

1.1 图像采集

无芒隐子草叶片采集的试验样地在鄂尔多斯鄂托克旗境内,东经 106°41′~108°54′,北纬 38°18′~40°11′,平均海拔 1 800 m,该地区气候属于典型的温带大陆性季风气候,日照丰富,四季分明,无霜期

短,降水少,全年较干旱。从试验样地中选取 4 个不同退化梯度样地(对照区 CK、轻度退化区 LD、中度退化区 MD 和重度退化区 HD),样区内主要植被包括无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、短花针茅(*Stipabreviflora*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)等,草地平均高度为 8 cm,盖度仅为 10% ~ 25%。

于 2016 年 7—8 月,分别在 4 个退化梯度样地随机设立样方 40 个,样方尺寸为 0.5 m × 0.5 m,在样方内随机选取同龄级、健康的无芒隐子草叶片 30 片,将其装入标准固定液(Formalin-acetic acid-alcohol, FAA),并置于 4℃ 恒温箱保存以备切片。

将无芒隐子草叶片从 FAA 标准固定液中取出,经软化、脱水、透明、浸蜡和包埋、切片、粘片和烘片、染色、封片等步骤完成石蜡制片^[14],获得永久性玻片,利用生物光学显微镜(YYs-80E 型)和配套的图像采集系统 CM1400 型摄像机结合计算机,采集和存储图像。处理与分析图像的计算机配置为 Intel Core i5CPU M480 @ 2.67 GHz, 6 GB 内存, Windows 7 操作系统,图像处理软件采用 Matlab 2015a。

1.2 目标与背景分割算法

对试验采集的图像,首先提取图像的 *R*、*G*、*B* 分量,根据图像特征确定灰度化方法,然后设计矩形结构元素,通过形态学开运算剔除粘连噪声,接着设计滤波器掩模矩阵,进行线性滤波以消除锯齿状边界,最后,采用最大类间方差(Otsu)方法自动选择阈值进行二值处理,实现目标和背景的分割。

1.2.1 灰度化

彩色图像灰度化直接影响最终分割精度,常用的灰度化方法有分量法、最大值法、平均法和加权平均法。为了提高算法鲁棒性,需要根据无芒隐子草叶片切片图像的特点选取合适的灰度化方案。

本文随机选取 30 幅测试图像,*R*、*G*、*B* 通道的均值分别为 197.7、197.5、190.8。为了较好地实现目标与背景的分离,使用红色特征灰度化方法,但图像中含有较高蓝色 *B* 分量,通过增大 *R*、减小 *G* 和 *B*^[15]来调整三色权重,适合无芒隐子草叶片解剖图像的灰度化方法为

$$G_{ray} = 2.8R - 1.1G - 1.4B \tag{1}$$

式中 G_{ray} ——灰度

为定量评价本文灰度化方案的有效性,采用图像信息熵(Entropy)、图像平均梯度(Average gradient)和图像对比度(Contrast)3 个指标进行评价。

1.2.2 形态学开运算

开运算处理可以断开狭小间断和消除细突出物,使对象轮廓变平滑。构造大小为 5 × 20 的矩形结构元素 *H*,对灰度化图像 *I* 进行开运算。

$$I \circ H = (I \ominus H) \oplus I \tag{2}$$

式中 $\circ$ ——开运算符号

$\ominus$ ——腐蚀运算符号

$\oplus$ ——膨胀运算符号

1.2.3 线性滤波

线性滤波可以消除锯齿状边缘,在 $M \times N$ 的图像 *I* 上,用大小为 $m \times n$ 的滤波器掩模进行线性滤波,计算公式^[16]为

$$g(x,y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s,t)I(x+s,y+t) \tag{3}$$

其中 $a = (m-1)/2$ $b = (n-1)/2$

式中 $g(x,y)$ ——滤波输出图像

$w(s,t)$ ——空间滤波器

1.2.4 最大类间方差

最大类间方差法是一种非参数化的全局阈值分割方法,是图像分割中自动阈值选取的最佳算法^[17-18]。

1.2.5 分割质量评价

为定量评价算法分割效果,本文在总结现有评价指标的基础上,采用误检率^[19](False positive rate, FPR)、漏检率^[20](False negative rate, FNR)和整体分割精度(Global segmentation accuracy, GSA)^[21]作为评价指标,对算法有效性进行检验,所需的金基准分割图通过 Photoshop 软件手动分割获得。FPR、FNR 值越小, GSA 值越大,分割精度越高。

1.3 目标参数测量

叶片卷曲度和厚度是叶片的重要参数指标,其定义如图 1 所示,叶片卷曲度(LW)为叶片图像中最远两点间的距离;叶片厚度(TL)为叶片上、下角质层之间的距离,在实际测量中,叶片厚度为图像左右边界上凹点与凹点、凸点与凸点之间的距离。在 1.2 节图像分割的基础上,根据目标参数实际测量方式,采用图像处理的方法实现叶片卷曲度和厚度的测量。

1.3.1 叶片卷曲度测量

结合无芒隐子草叶片解剖结构图像轮廓的特点,采用 8-邻域边界跟踪算法^[22]获得图像边界上所有像素点,应用 Graham 算法^[23-24]构造凸包,搜索叶片解剖结构图像的最小外接矩形(Minimum bounding rectangle, MBR),从而求出叶片卷曲度。算法的具体步骤为:

(1)采用 8-邻域边界跟踪算法提取图像边界,

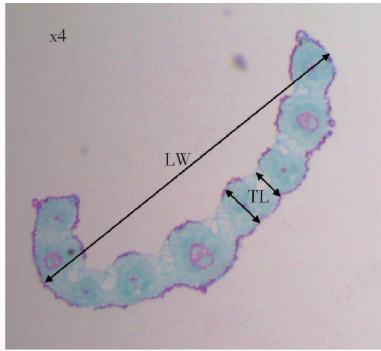


图 1 叶片卷曲度和厚度测量方式

Fig.1 Actual measurement mode of leaf rolling index and thickness

设边界点坐标集为 S 。

(2) 采用 Graham 算法构造图像轮廓凸包。
①寻找 S 中距离 y 轴最近的点设为基点 P_0 。②将 S 中其余点和基点 P_0 构成向量,并根据极角由小到大排序,记为 $P_0, P_1, \dots, P_n$,如果有多个相同的极角点,只保留极径最大的点。③将 P_0, P_1, P_2 入栈。④对任意点 P_i ,如果栈顶的 2 个点与其不构成“左旋”关系,则将栈顶的点出栈,直到没有点出栈,再将当前点进栈。所有点处理完之后,最后栈中保存的点为目标图像完整凸包。

(3) 提取叶片最小外接矩形。①随机选取凸包左右两端点,设为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$,构成起始边 AB ,以点 A 为中心旋转角 θ ,使该边平行于 x 坐标轴。②凸包上的所有点围绕点 A 旋转角 θ 。③以 AB 为上(下)边界,找到 y 值最小(最大)的一个点,经过此点作平行于 x 轴的直线,这就确定了下(上)边界。然后找到 x 值最小和最大的左侧点和右侧点,经过这两个点分别做垂直于 x 轴的两条直线,确定对应的左右边界。这样即可得到一外接矩形,计算并保存边 AB 、旋转角 θ ,此时记录外接矩形的顶点坐标和面积。④顺序选择下一条边 BC ,若此边已经选择,则顺序执行,否则跳转至步骤①,比较所有外接矩形的面积,找出其中面积最小的外接矩形。⑤根据步骤③中的记录,求出叶片的卷曲度。

1.3.2 叶片厚度测量

本文在提取叶片外边界的基础上,应用改进的凹、凸点检测算法提取图像外边界的凹点和凸点,最后进行凹点与凹点匹配、凸点与凸点匹配,应用欧几里得距离计算出叶片厚度。

传统矢量积法检测出大量与实际测量不相符的无用点,给后续准确匹配凹凸点带来不便,为获得较为准确的、符合实际测量点的凹点和凸点,本文提出将角点检测和矢量积法相结合的凹凸点检测算法,算法首先采用最小周长多边形近似法获取轮廓顶

点,应用自适应阈值和支持动态区域的曲率尺度空间角点检测算法^[21]预选出候选的凹凸点,结合矢量积法检测出顶点的凹凸性,剔除角点中非凹、凸点,剩余角点即为有用的凹凸点。算法具体步骤为:
①求无芒隐子草叶片解剖结果图像的最小外接矩形,并对其进行旋转,使得长轴平行于 y 坐标轴。
②获取无芒隐子草叶片解剖结构图像最小周长近似多边形和顶点集合 $P_v(v=1,2,3,\dots)$ 。
③根据矢量积法获取凹点集 P_a 和凸点集 P_i 。
④填充步骤①中获得的无芒隐子草叶片解剖结构图像的边缘轮廓断裂点,找到 T 形角点。
⑤计算轮廓上每个点的曲率。
⑥将局部曲率最大值点设为候选角点,并根据自适应阈值剔除圆角点,同时剔除因噪声和细节产生的伪角点,阈值设定和伪角点判断准则见文献[25]。
⑦在较低尺度下对已确定的角点定位。
⑧比较 T 形角点与提取出角点的距离,剔除两个相隔较近的其中一个角点,得到最终正确的角点集 C 。
⑨将 C 设为候选凹凸点集,分别与 P_a 和 P_i 中的点进行距离对比,从而将 C 中的点分为凹点集 C_i 和凸点集 C_o 。
⑩对 C_i 和 C_o 中的点分别按照 y 坐标的升序排序。
⑪以 y 坐标值最大点为分界点,将 C_i 和 C_o 分别分为左右集合:凹点左集合(C_{il})、凹点右集合(C_{ir})、凸点左集合(C_{ol})、凸点右集合(C_{or})。
⑫将 C_{il} 与 C_{ir} 中的点根据距离进行凹点匹配,并求出匹配点之间的欧氏距离,同样,将 C_{ol} 和 C_{or} 中的点根据距离进行凸点匹配,并求出匹配点的欧氏距离,进而求出叶片厚度。

2 试验与结果分析

2.1 灰度化处理

对任意选取的 30 幅无芒隐子草叶片解剖结构图像进行试验,图 2 为分别采用不同方法处理后的效果图,由图 2 可知,采用本文方法处理后,能够明确区分维管束、泡状细胞、叶肉组织等解剖结构,图像对比度明显提升。

表 1 给出了任意选取的 30 幅图像经本文方法处理后的图像信息熵、平均梯度、对比度,并与分量法、最大值法、平均法、加权平均法进行对比,结果显示,采用本文方法处理后,图像的各项指标均明显高于其余 4 种方法处理后的结果。

图 3 为应用不同灰度化方法对无芒隐子草叶片解剖结构图像灰度化后,经形态学开运算、线性滤波和阈值分割后的分割结果对比图,由图 3 可知,本文提出的方法使目标分割结果更为完整、准确。

2.2 目标和背景分割试验

图像灰度化处理后,经形态学开运算、线性滤

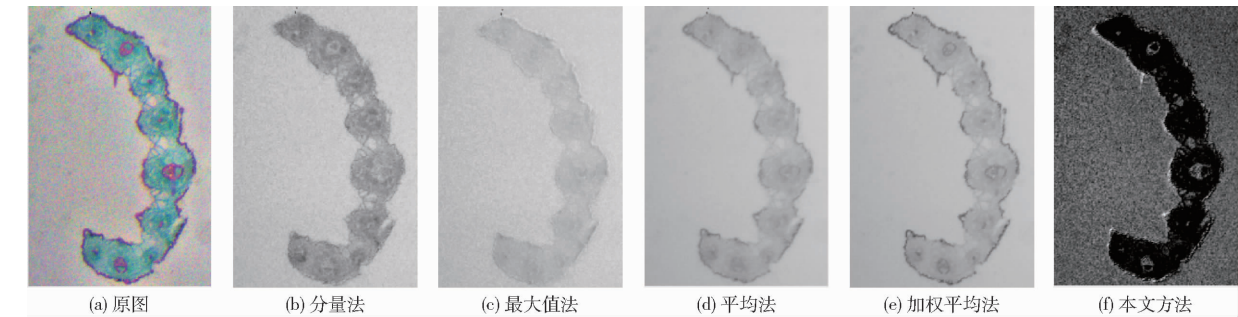


图 2 不同灰度化方法处理后的效果图

Fig. 2 Grayscale results with different methods

表 1 不同灰度化方法处理效果评价

Tab. 1 Evaluation of image grayscale results with different methods			
处理方法	信息熵	平均梯度	对比度
分量法	6. 361 2	0. 024 2	0. 113 0
最大值法	5. 667 9	0. 015 8	0. 057 4
平均法	5. 934 8	0. 009 3	0. 070 3
加权平均法	6. 052 6	0. 010 4	0. 078 4
本文方法	6. 428 0	0. 078 5	0. 264 1

波、阈值分割,获得最终分割结果,如图 4 所示。试验提取了参照图目标边界(图 4e),并将提取的边界叠加于分割结果图(图 4f),结果显示,分割后的目标区域与目标原边界基本吻合。

表 2 给出了 30 幅图像试验的平均误检率、平均漏检率和整体分割精度。由表 2 可知,平均误检率为 0. 75%,平均漏检率为 3. 49%,整体分割精度达到 98. 14%。结果表明本文算法能够实现目标和背

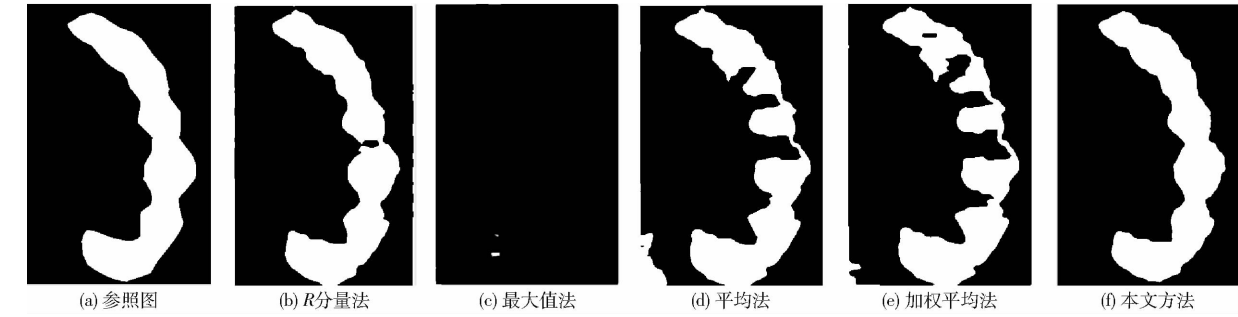


图 3 不同方法灰度化后的分割结果

Fig. 3 Segmentation results after different grayscale methods

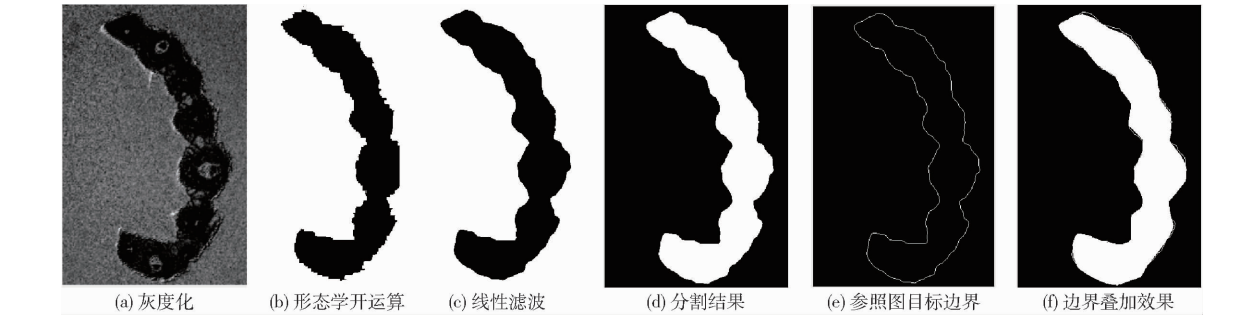


图 4 目标与背景分割示例

Fig. 4 Example of target and background segmentation

表 2 分割效果评价结果

Tab. 2 Evaluation of segmentation results %			
图像序号	平均误检率	平均漏检率	整体分割精度
1	0. 98	3. 83	98. 33
2	1. 09	4. 08	97. 57
3	0. 50	3. 73	99. 14
4	0. 59	3. 84	98. 84
5	0. 55	3. 22	98. 55
⋮	⋮	⋮	⋮
30	0. 96	2. 91	97. 91
平均值	0. 75	3. 49	98. 14

景的精确分割,满足后续特征参数测量需求。

2. 3 目标参数测量试验

2. 3. 1 叶片卷曲度测量

图 5 为目标卷曲度测量试验示例,由图 5 可知,对于任意朝向的无芒隐子草叶片图像均可以求得其最小外接矩形,最小外接矩形长度与无芒隐子草叶片卷曲度的实际测量方式结果相符。

表 3 为本文方法测量值与显微镜自带软件

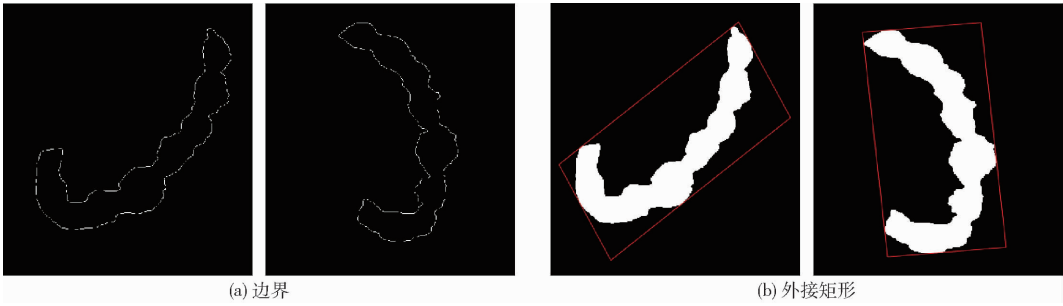


图 5 叶片卷曲度测量示例

Fig. 5 Example of measurement on leaf rolling index

表 3 叶片卷曲度测量值与交互式测量值比较

Tab.3 Comparison on value of leaf rolling index between algorithm measurement and interactive measurement

图像序号	交互式测量	本文方法测量	相对误差/%
	均值/ μm	值/ μm	
1	984.79	978.09	0.68
2	1 270.55	1 267.38	0.25
3	1 285.63	1 267.70	1.39
4	972.16	961.80	1.07
5	976.92	969.44	0.77
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	1 169.42	1 165.34	0.35
平均值	1 058.27	1 048.28	0.96
平均耗时/s	55.28	4.87	

ToupTek Toupview 交互式多次测量均值对比,由表 3 可知,本文方法测量值与交互式测量均值平均相对误差为 0.96%,速度提高了约 10 倍,结果表明本文方法可以准确测量无芒隐子草叶片卷曲度。

2.3.2 叶片厚度测量

试验过程示例如图 6 所示,结果显示,传统的矢

量积法检测出较多与实际测量不相符的凹凸点(图 6d),本文方法剔除了许多无用点(图 6e),最终实现的凹点与凹点、凸点与凸点之间的连线与实际测量方式相符。

表 4 给出了 30 幅测试图像应用本文方法测量与应用显微镜自带软件 ToupTek Toupview 交互式测量均值对比,由表 4 可知,通过本文方法测量的平均相对误差仅为 3.69%,速度提高了约 37 倍,说明本文方法可以较为准确地测量无芒隐子草叶片厚度,且极大地提高了效率。

3 结论

(1)提出了适合无芒隐子草叶片解剖结构图像 的红色灰度化方案,并与分量法、最大值法、平均法、加权平均法进行对比,结果表明,本文方法优于其他 4 种方法。使用最大类间方差结合形态学开运算和线性滤波,实现了无芒隐子草叶片解剖结构图像目标 和背景的准确分割,30 幅图像分割的平均误检率 为 0.75%,平均漏检率为 3.49%,平均整体分割精 度达到了 98.14%。

(2)提出了采用 Graham 算法构造凸包的最小

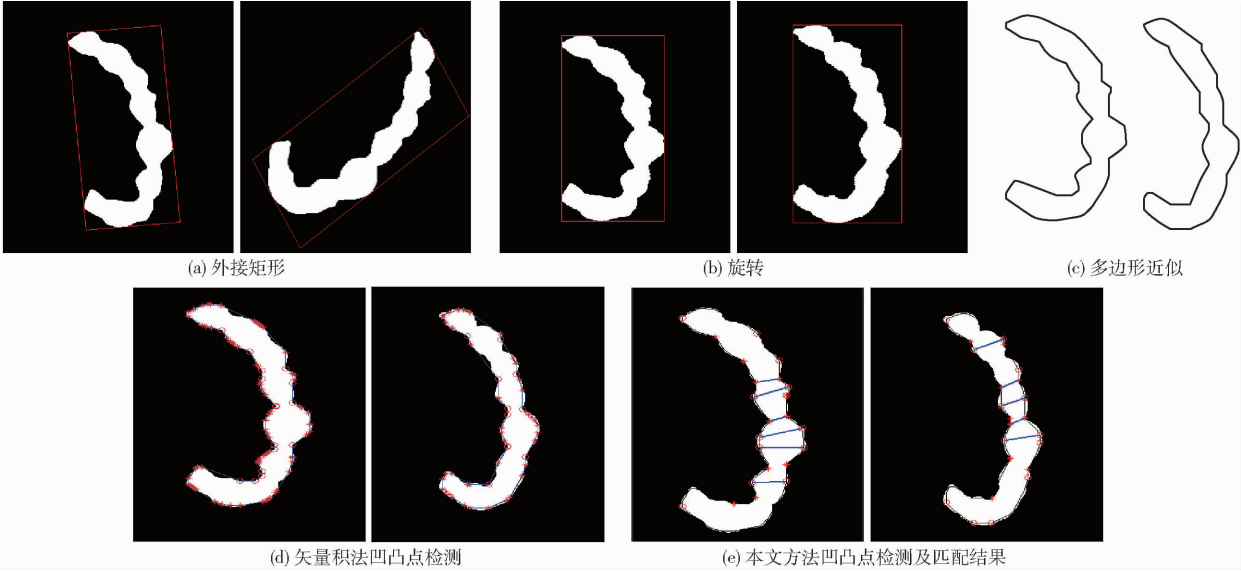


图 6 叶片厚度测量示例

Fig. 6 Example of measurement on leaf thickness

表4 叶片厚度测量值与交互式测量值比较

Tab.4 Comparison on value of leaf thickness between proposed algorithm and interactive measurement

图像序号	交互式测量均	本文方法测量	相对误差/%
	值/ μm	值/ μm	
1	87.34	83.65	4.22
2	90.79	86.63	4.58
3	95.44	92.13	3.47
4	102.94	99.11	3.72
5	98.87	94.58	4.34
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
30	106.45	102.83	3.40
平均值	98.54	94.91	3.69
平均耗时/s	186.40	4.92	

外接矩形法,实现了叶片卷曲度的准确测量。将测量值与交互式测量均值进行了对比,30幅测试图像的平均相对误差为0.96%,速度提高了约10倍。

(3)提出了角点检测和矢量积法相结合的凹凸点检测算法,结合凹点匹配和凸点匹配实现了叶片厚度的准确测量,将测量值与交互式测量均值进行了对比,30幅测试图像的平均相对误差为3.69%,速度提高了约37倍。

(4)本文通过图像处理手段实现了无芒隐子草叶片解剖结构特征参数的提取和测量,克服了人工交互测量效率低、实现性差的缺点。

参 考 文 献

[1] 徐焕良,马仕航,王浩云,等.基于几何模型的绿萝叶片外部表型参数三维估测[J/OL].农业机械学报,2020,51(12):220-228.
XU Huanliang, MA Shihang, WANG Haoyun, et al. Three-dimensional estimation of money plant leaf external phenotypic parameters based on geometric model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 220-228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201224&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.024. (in Chinese)

[2] 王树森,孟凡旭,赵波,等.大青山阳坡五种灌木叶片解剖结构及其抗旱性研究[J].中国农业科技导报,2020,22(1):38-44.
WANG Shusen, MENG Fanxu, ZHAO Bo, et al. Leaf anatomic structure of five shrubs and its effects on drought tolerance in sunny slope of daqing mountain[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(1): 38-44. (in Chinese)

[3] 韩永芬,卢欣石,孟军江,等.菊苣航天诱变新品系叶片旱生结构的比较研究[J].中国草地学报,2011,33(1):111-116.
HAN Yongfen, LU Xinshi, MENG Junjiang, et al. Study on anatomical structures related to drought resistance of leaves of new strains of chicory mutated in space[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(1): 111-116. (in Chinese)

[4] 徐贵力,毛罕平,胡永光.基于计算机视觉技术参考物法测量叶片面积[J].农业工程学报,2002,18(1):154-157.
XU Guili, MAO Hanping, HU Yongguang. Measuring area of leaves based on computer vision technology by reference object[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 154-157. (in Chinese)

[5] 聂鹏程,杨燕,刘飞,等.植物叶面积无损测量方法及仪器开发[J].农业工程学报,2010,26(9):198-202.
NIE Pengcheng, YANG Yan, LIU Fei, et al. Method of non-destructive measurement for plant leaf area and its instrument development[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 198-202. (in Chinese)

[6] 刘九庆,朱福安.应用电感式位移传感器设计的叶片厚度检测仪[J].东北林业大学学报,2018,46(2):84-87.
LIU Jiuqing, ZHU Fuan. Leaf thickness detector designed by the lateral inductive displacement transducer[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(2): 84-87. (in Chinese)

[7] 郭文川,周超超,韩文霆.基于Android手机的植物叶片面积快速无损测量系统[J/OL].农业机械学报,2014,45(1):275-280.
GUO Wenchuan, ZHOU Chaochao, HAN Wenting. Rapid and non-destructive measurement system for plant leaf area based on Android mobile phone[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 275-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140142&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.042. (in Chinese)

[8] 苑玮琦,胡迪.利用矩实现植物叶片长宽的测量[J].计算机工程与应用,2013,49(16):188-191.
YUAN Weiqi, HU Di. Measurement of leaf blade length and width based on moment[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(16): 188-191. (in Chinese)

[9] 杨红云,孙爱珍,何火娇.水稻叶片几何参数图像视觉测量方法研究[J].湖北农业科学,2015,54(17):4317-4320.
YANG Hongyun, SUN Aizhen, HE Huojiao. Study on the geometry parameter of rice leaf measuring method using image vision technology[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(17): 4317-4320. (in Chinese)

[10] 郭斯羽,董红霞,张翌.一种用于植物叶片图像骨架提取的去毛刺方法[J].电子测量与仪器学报,2013,27(1):52-56.
GUO Siyu, DONG Hongxia, ZHANG Yi. Pruning method for skeletonization of plant leaf images[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(1): 52-56. (in Chinese)

[11] 王浩云,肖海鸿,马仕航,等.基于MRE-PointNet+AE的绿萝叶片外形参数估测算法[J/OL].农业机械学报,2021,52(1):146-153.
WANG Haoyun, XIAO Haihong, MA Shihang, et al. Estimation algorithm of leaf shape parameters of *Scirpus sibiricum* based on MRE-PointNet and autoencoder model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 146-153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210116&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.016. (in Chinese)

- [12] 龚爱平, 吴武豪, 裴正军, 等. 基于 Android 系统手机的叶面积测量方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 203–208. GONG Aiping, WU Wuhao, QIU Zhengjun, et al. Measurement system of rice flag leaf angle based on Android smart phone[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 203–208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&fileno=20130936&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.36. (in Chinese)
- [13] DHONDT S, VAN H D, VAN C C, et al. Quantitative analysis of venation patterns of *Arabidopsis* leaves by supervised image analysis[J]. The Plant Journal, 2012, 69(3): 553–563.
- [14] 王海超, 王春光, 宗哲英, 等. 基于噪声类型及强度估计的狭叶锦鸡儿叶切片图像盲去噪[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 229–238. WANG Haichao, WANG Chunguang, ZONG Zheyang, et al. Blind image denoising of microscopic slices image of *Caragana stenophylla* Pojark based on noise type and intensity estimation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 229–238. (in Chinese)
- [15] 李林, 魏新华, 朱文静, 等. 宽幅施药机械机器视觉辅助导航系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 28–33. LI Lin, WEI Xinhua, ZHU Wenjing, et al. Research on auxiliary navigation system for wide spraying mechanis based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 28–33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150904&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.004. (in Chinese)
- [16] 王福杰, 饶秀勤, 应义斌. 苹果图像的背景分割与目标提取[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 196–199, 210. WANG Fujie, RAO Xiuqin, YING Yibin. Background segmentation and object extraction of apples images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 196–199, 210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130137&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.037. (in Chinese)
- [17] CAO J, CHEN L, WANG M, et al. Implementing a parallel image edge detection algorithm based on the Otsu-Canny operator on the hadoop platform[J]. Computational Intelligence & Neuroscience, 2018, 3598284.
- [18] 李宝芸, 范玉刚, 高阳. 基于 Otsu 和 Canny 算子的红外图像特征提取[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 33–40. LI Baoyun, FAN Yugang, GAO Yang. Infrared image feature extraction based on Otsu and Canny operator[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 35(6): 33–40. (in Chinese)
- [19] 刘平, 朱衍俊, 张同勋, 等. 自然环境下贴叠葡萄串的识别与图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 161–169. LIU Ping, ZHU Yanjun, ZHANG Tongxun, et al. Algorithm for recognition and image segmentation of overlapping grape cluster in natural environment[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 161–169. (in Chinese)
- [20] 汪启伟. 图像直方图特征及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014. WANG Qiwei. Study on image histogram feature and application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [21] 薛萍. 基于超像素特征表示的图像前景背景分割算法[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 731–735. XUE Ping. Foreground and background segmentation based on super pixel level feature representation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 731–735. (in Chinese)
- [22] 熊显阔. 钮扣特征检测与分类识别算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. XIONG Xiankuo. Research on algorithm of feature detection and classification for button[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] 吴文周, 李利番, 王结臣. 平面点集凸包 Graham 算法的改进[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 123–125. WU Wenzhou, LI Lifan, WANG Jiechen. An improved Graham algorithm for determining the convex hull of planar points set[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6): 123–125. (in Chinese)
- [24] 宋鹏, 张哈, 王成, 等. 玉米籽粒考种信息获取装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 19–25. SONG Peng, ZHANG Han, WANG Cheng, et al. Design and experiment of maize kernel traits acquisition device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 19–25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171202&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.002. (in Chinese)
- [25] HU X C, YUNG N H C. Corner detector based on global and local curvature properties[J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 1–12.