



基于图像法的离体小麦叶片几何参数计算

张万红*

(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要 针对目前植物叶片几何参数计算中的一些不足, 提出适用于离体小麦叶片叶面积、叶长、叶宽和周长的计算方法。首先使用直方图阈值法对特定背景下小麦图像进行分割; 然后采用统计像素数法计算小麦叶面积, 采用叶片边缘相邻像素间距离的方法计算周长, 使用改进后的最小外接矩形法计算叶长和叶宽; 最后对计算结果与实测值进行比较, 并使用统计分析方法对计算结果进行检验。结果显示, 计算值接近实测值, 叶面积、叶长和叶宽的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 0.49 cm²、0.57 cm、0.04 cm, 决定系数 (R^2) 分别为 0.99、0.97、0.96。RMSE 值接近于 0、 R^2 值接近于 1, 以及计算值与测量值之间存在的较小差异, 表明改进后的叶长和叶宽算法的计算结果不受小麦叶片形状的影响, 方法普适性好, 且叶长、叶宽、叶面积和周长算法对相应参数的计算结果准确度高。

关键词 小麦叶片; 图像分割; 叶面积; 叶周长; 叶长; 叶宽

中图分类号 S 24 文献标志码 A

Geometrical parameter calculation of excised wheat leaves based on image analysis. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2018, 44(6): 748-754

ZHANG Wanhong* (*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*)

Abstract Aiming at some deficiency of geometrical parameter calculation in plant leaves at present, we proposed a computational method suitable for measuring area, length, width and perimeter of excised wheat leaves. Wheat image was segmented under a certain background by histogram algorithm. Leaf area was calculated by statistical image number method, and leaf perimeter was calculated on the distance between adjacent pixels of the blade edge. Leaf length and width were measured by improved minimum enclosing rectangle. Then the calculated results were compared with the measured values, and statistical analysis was carried out. The results showed the calculated results were close to the measured values. The root mean square error (RMSE) values for area, length and width of wheat leaves were 0.49 cm², 0.57 cm and 0.04 cm, respectively. The coefficient of determination (R^2) for area, length and width of wheat leaves were 0.99, 0.97 and 0.96, respectively. The differences in RMSE values were close to 0 and R^2 values were close to 1, and the calculated results and the measured values were insignificant, indicating that the improved algorithms for measuring area, length, width and perimeter of wheat leaves are not influenced by wheat leaf shapes, suitable for different conditions, reliable and practicable.

Key words wheat leaf; image segmentation; leaf area; leaf perimeter; leaf length; leaf width

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-306-03)。

*通信作者 (Corresponding author): 张万红 (<https://orcid.org/0000-0002-0101-3220>), E-mail: zhwhong@nwfafu.edu.cn

收稿日期 (Received): 2017-07-13; 接受日期 (Accepted): 2017-11-29

叶片是植物进行光合作用、蒸腾作用和合成有机物的主要器官^[1-2],叶片的几何参数则是衡量植物生长发育、产量形成和品种特性的重要指标,也是植物进行合理栽培管理及病虫害发生监测的重要数据支撑^[3]。小麦(*Triticum aestivum* L.)在中国种植历史悠久,种植范围广^[4-6],因此,准确地测量小麦的叶长、叶宽、周长、叶面积等几何参数,对指导小麦生产及病虫害防治等有重要的意义。

目前,测量离体植物叶片几何参数的方法可以分为传统方法、叶面积仪法和图像法^[7]。在传统方法中,叶长、叶宽通常采用直尺或者游标卡尺直接测量,周长采用直尺结合细绳等工具进行测量,叶面积则主要以坐标纸法、系数法、复印称质量法等进行测定,这些方法的操作一般较为烦琐,且其中一些方法得到的结果误差较大^[7-8]。叶面积仪法的测量精确度较高,但仪器昂贵^[9-10],维修不方便,不适用于过宽和过长叶片的叶面积测量^[7,11],目前大多数研究利用叶面积仪来验证其他方法测量叶面积的结果^[12-14]。图像法与其他方法相比,测量精度高、成本低廉、操作相对容易^[7],具有随待测目标的特点、测定要求不同而灵活多变等特征。目前采用图像法对叶面积进行测量的方法主要分为计算目标影像像素数法^[18,15]、边界链码法和边界坐标计算法。利用以上3种方法计算得到的面积参数值非常相近,测量精度也相差不多,但是在理论上,用像素数法计算植物叶片面积的精度比后两者高^[16]。采用图像法计算植物叶片的周长,通常以影像分割为基础,对分割后的目标影像求边缘链码长度、统计边缘像素数和计算隙码数目,最后将链码长度、像素数和隙码数换算为叶片实际周长值^[16-17]。就计算结果的准确率而言,链码法高于统计边缘像素数法和隙码法,这是因为在周长的计算方法中,链码法对像素邻域范围内倾斜方向像素间的距离也进行了计算^[16],但链码法对边界的跟踪效率差,耗时长^[18]。对于叶长和叶宽的测定,图像法通常通过旋转法^[19]求得叶片的最小外接矩形,再以此外接矩形的长和宽作为叶片的长和宽^[20-21]。此方法对于细长且对称的叶片测量准确率高,但对形状不规则的叶片测量准确率低^[22]。

针对上述问题,结合小麦叶片特征,本文借助Matlab平台,以影像分割为基础,主要对以最小外接矩形长和宽为依据确定叶长和叶宽的方法进行

了改进。改进后的方法首先确定外接矩形与叶片间切点的像素坐标,然后以切点与对边叶缘连线间的线段长度为依据确定叶长和叶宽。利用改进后的方法计算的结果不受叶片形状的影响,方法具有普适性且准确率高。对于周长和叶面积的计算,选择更适宜于小麦叶片的统计像素数法和计算叶边缘相邻像素间距离的方法进行。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

小麦叶片采集于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站,该试验站地处黄土高原中南部,地理坐标为107°41' E, 35°12' N,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量580 mm,年均气温9.1℃,无霜期171 d,地下水位50~80 m,地带性土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松,通透性好。

1.2 小麦叶片图像采集

2017年5月初,将采集到的20片离体小麦叶片平铺并正放在长宽已知的白色背景纸(29.7 cm×21 cm)上,在室内自然光照条件下,使用华为荣耀7手机(自然曝光模式)垂直对小麦叶片进行拍照。在图像进行分割处理前,为方便图像处理,在不影响图像中目标与背景形状及颜色的前提下,图像统一变换为2 385×1 672像素,并以JPEG格式导入计算机。

1.3 小麦叶片几何特征提取方法及步骤

1.3.1 小麦叶片图像的分割

对小麦叶片RGB(红、绿、蓝)图进行灰度化处理,并做直方图,根据直方图波谷值确定图像二值化的阈值。灰度图像直方图(图1)显示,波峰和波谷清晰可辨,图像明显被分为3个部分,左边波峰为目标图像,右边波峰为背景图像,波谷为分割图像的边缘。当灰度图像像素值为150时,前景目标可被完整分割。因此,本文选择像素值等于150作为小麦叶图像的分割阈值。将小麦叶片图像进行分割后,对图像进行孔洞填充和去除干扰点操作。

1.3.2 小麦叶片几何特征提取

1.3.2.1 小麦叶面积的计算

采用统计像素法,对二值化后的小麦叶片图像统计前景目标的像素数,并计算前景图像像素数占整个二值图像像素数的百分比,将百分比数乘以二值

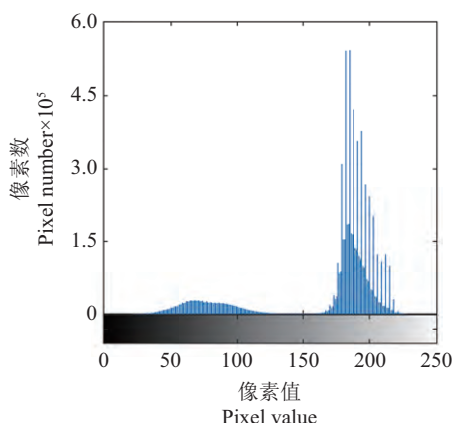


图1 灰度图像柱状图

Fig. 1 Histogram of grayscale image

图的实际面积数,乘积即为小麦叶片的实际叶面积,计算公式如下:

$$S = \frac{P_a \times R_a}{P_t} \quad (1)$$

式中: S 为小麦叶片面积, P_a 为小麦叶片像素数, P_t 为二值图像素数, R_a 为二值图的实际面积。

1.3.2.2 小麦叶周长的计算

使用 Matlab 中的“bwboundaries”命令提取二值图中小麦叶片边缘像素坐标,并利用两点间距离公式^[20]计算相邻像素间的距离,对所有像素间的距离进行累加,和即为叶周长。两点间距离公式如下:

$$P_e = \sum_k^{N_b} [(C_k - C_{k+1})^2 + (W_k - W_{k+1})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: P_e 为小麦叶周长, k 为小麦叶边缘像素, N_b 为小麦叶边缘像素个数, C_k 、 W_k 为小麦叶边缘像素坐标。

1.3.2.3 小麦叶宽和叶长的计算

叶片图像可以有多个外接矩形,其中面积最小的称为最小外接矩形^[23]。最小外接矩形与小麦叶片4个方向的切点分别代表了小麦叶片图像上、下、左、右4个方向的边界点。分别对小麦叶片图像4个方向的边界点坐标进行确定,从确定后的边界点中选取左右2个方向的边界点,并分别从左右2个方向的边界点作最小外接矩形对边的垂线,垂线与叶缘相交,交点与切点间有多条线段,其中最长的线段长度确定为叶宽^[24]。叶片顶端到末端的距离称为叶长^[24],计算叶片上边界点与下边界点像素之间的距离,其长度确定为叶长。

1.4 结果评价

为了对本文算法结果进行检验,用 LI-3100C

便携叶面积仪(LI-COR公司,美国)测量目标叶片的叶面积、叶长、叶宽各3次,取其平均值为测量值,并对测量结果与本文算法结果进行决定系数(R^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)计算^[25],计算公式如式(3)和(4)所示。由于周长的测量目前尚无可靠的实测方法,因此使用本文算法对硬币的周长进行计算,并将计算结果与硬币实际周长值进行比较,以检验本文算法对小麦叶片周长计算结果的可靠性。

决定系数(R^2):相关系数 r 的平方值,表明预测值解释实际值变差的程度。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中: n 为样本数; X_i 为根据本文算法求取的样本 i 的测量值, \bar{X} 为 X_i 的平均值; Y_i 为样本 i 的测量值, \bar{Y} 为 Y_i 的平均值。

用 RMSE 检验本文算法结果与实测值的符合精确度,计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

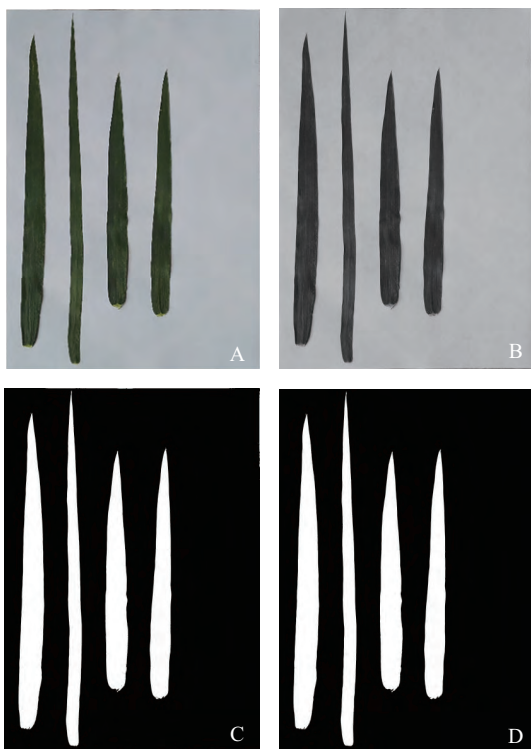
式中: n 为样本数; X_i 为根据本文算法求取的样本 i 的测量值; Y_i 为样本 i 的测量值。

2 结果与分析

2.1 小麦叶片图像二值化

对小麦叶片图像(图2A)进行灰度化处理后(图2B),采用阈值法对目标图像进行分割,分割效果图如图2C所示。可以看出,分割后的图像前景突出,背景与前景目标区分明确,前景目标结构完整,前景边缘清晰可辨,图像中影响后续计算的干扰项少,但图像边缘层次不齐,图像中有独立的干扰点,有些叶片图像中也有小孔洞存在。在本研究中,前景的唯一性和小麦叶片图像的完整性是准确计算小麦叶面积、周长、叶长和叶宽的前提,其中图像的完整性则直接影响后续小麦叶片几何参数的计算结果。为了实现小麦叶片二值图中前景目标的唯一性,对图像二值化过程中产生的干扰点进行清除处理,使二值图中小麦叶片为仅有的前景目标;为了恢复图像的完整性,使用 Matlab 的“imfill”命令对图像中的孔洞进行填充。小麦叶

片二值图经过干扰点清除及孔洞填充后的效果如图2D所示。可以看出,独立的细小干扰点已被清除,前景目标清晰明确,背景干净,图像边缘完整,前景图像中的孔洞被填充后叶片结构完整,叶边缘无缺失且清晰。



A: 原始图; B: 灰度图; C: 二值化图; D: 去除干扰点及孔洞填充后的二值图。

A: Original image of wheat leaves; B: Grayscale image of wheat leaves; C: Binary image of wheat leaves; D: Binary image of wheat leaves after removing disturbance point and filling holes.

图2 小麦叶片的二值化图像

Fig. 2 Binary image of wheat leaves

2.2 小麦叶面积、周长、叶宽及叶长的计算

对小麦叶片图像进行二值化处理后计算叶面积、周长、叶宽和叶长。首先采用统计像素数法对小麦叶面积进行计算,该方法可以计算多个小麦叶片的叶面积,对小麦叶片图像中的单个叶片进行分离后,也可以实现对单个叶片叶面积的计算。为了实现对单个叶片叶面积的计算,分离图2D中的叶片,结果如图3所示。可以看出,采用分离算法的单个叶片被完整分离,每张叶片在原图中的位置保留不变,且叶片形状完整,边缘清晰。对分离后的叶片采用统计像素数法计算叶面积,并将计算结果与测量结果进行比较,结果如图4所示。可以看出,叶面积值紧靠1:1线且大部分数值在1:1线以上呈单

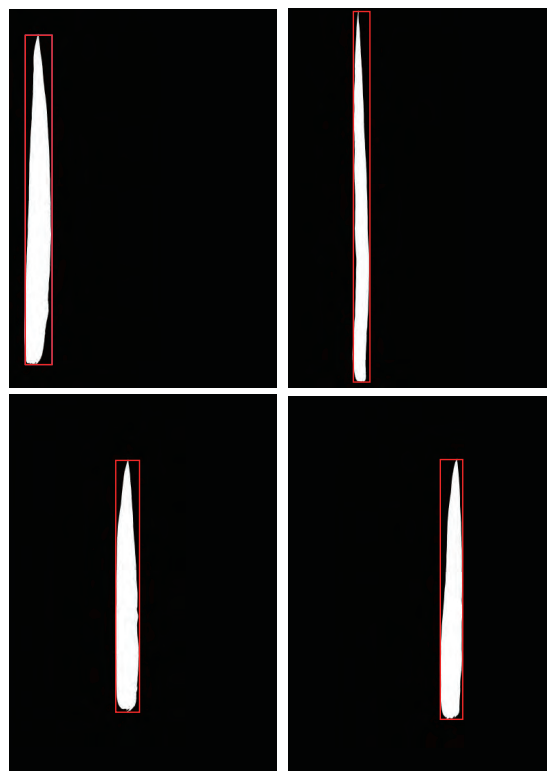


图3 单张小麦叶片的最小外接矩形

Fig. 3 Minimum enclosing rectangle of single leaf separated from the whole

侧排列,表明计算值与测量值接近且计算值略高于测量值。

提取图2D中每个小麦叶片的边缘像素坐标,并计算小麦叶片周长。提取后的单个叶片小麦边缘像素坐标信息如图5所示,图中的蓝色曲线代表边缘像素的坐标值。可以看出,叶片尖端边缘像素的纵坐标最小,叶片末端边缘像素的纵坐标最大,横坐标最大的边缘像素为叶片的右边界,横坐标最小的像素为叶片的左边界,随着每张叶片形状的不同,其边缘像素在图像中的坐标值也发生相应变化。使用周长算法计算小麦叶片周长,并对计算结果进行验证。由于目前没有较好的求叶片周长的非图像处理方法的报道,因此本文采用间接的方法对计算结果进行验证。验证方法为:根据本文算法分别计算1元、5角和1角硬币的周长,并将计算结果分别与真实值进行比较。根据本文算法的计算值分别为7.72、6.31和5.90 cm,真实值为7.85、6.28和5.97 cm,计算值与真实值接近。

使用最小外接矩形法对小麦叶片上、下、左、右4个方向的边界进行界定后,计算小麦叶长和叶宽。图3中叶片外红色的边框即为小麦叶片的最

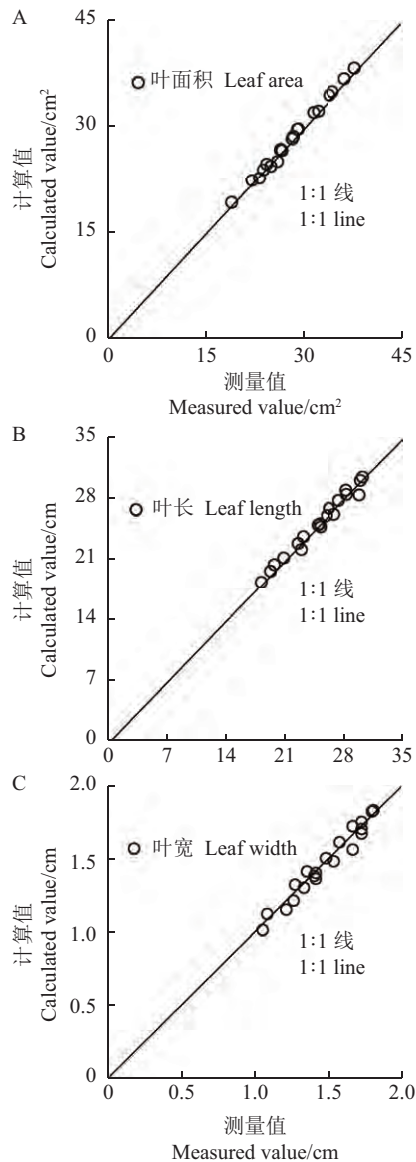


图4 小麦叶面积(A)、叶长(B)和叶宽(C)的测量值与计算值
Fig. 4 Calculated and measured values of wheat leaf area (A), leaf length (B) and leaf width (C)

小外接矩形,叶片的尖端、末端及叶片两侧边缘分别与最小外接矩形相切,切点为叶片上、下、左、右4个方向的边界点。在计算开始之前,根据叶长和叶宽的定义^[24],首先必须对叶片4个方向的边界点像素坐标进行确定,由于叶片边缘像素的坐标值在周长计算阶段已被确定,因此只需找出4个方向的边界点像素坐标,然后根据两点间距离公式即可求解叶长和叶宽。在实际计算过程中,由于叶尖和叶末端与最小外接矩形的接触面小,它们的边界像素数少,有时候尖端和末端的边缘像素往往各自都只有1个,这样只要对2个像素间的距离进行计算,就可以确定叶长,计算量小。但小麦叶

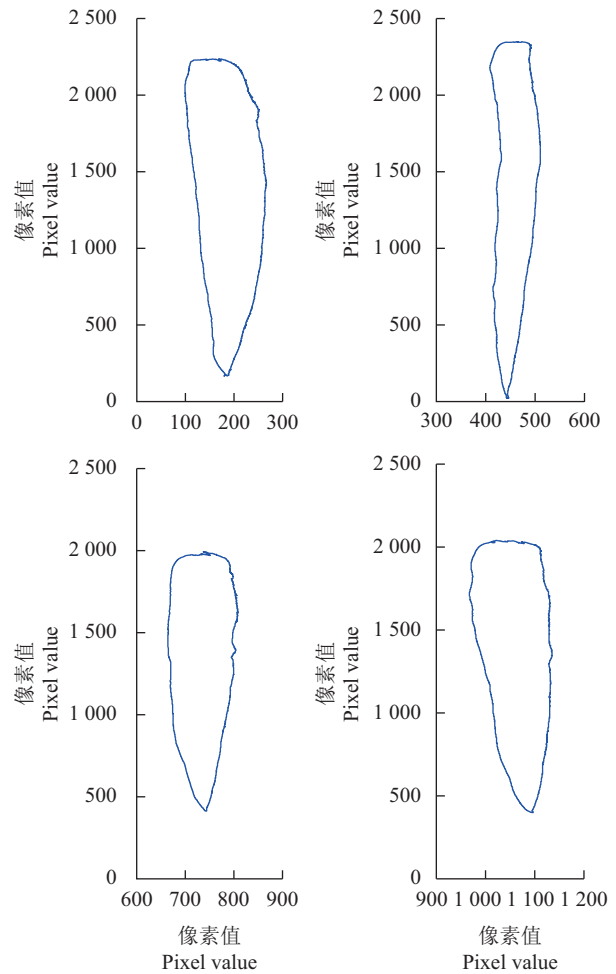


图5 单张小麦叶片的边缘坐标信息

Fig. 5 Marginal coordinate information of single wheat leaf

宽的计算与小麦叶长不同,由于小麦叶缘的结构往往不是突出的尖端,而是多呈现为平缓的曲线,部分叶缘的外形甚至呈现为直线,这样最小外接矩形与小麦叶缘的切点有时候会有多个,图3中最小外接矩形与叶缘相切部位呈现为直线也证明了这种现象的存在,因此在叶宽计算过程中增加循环运算。计算结束后,对计算结果与实测值进行比较,结果如图4所示。可以看出,叶长和叶宽的计算值与实测值紧密贴近1:1线排列,表明计算值与实测值接近。

2.3 结果评价

通过 R^2 和RMSE对计算结果进行评价。由表1可知,叶面积、叶长和叶宽的RMSE值分别为 0.49 cm^2 、 0.57 cm 和 0.04 cm , R^2 值分别为 0.99 、 0.97 和 0.96 ,靠近0值的RMSE值和接近1值的 R^2 表明,本文计算小麦叶面积、叶长和叶宽的结果与实测值接近,计算结果的准确率高。

表1 小麦叶片几何特征参数的测量值与计算值之间的均方根误差和决定系数

Table 1 Determination coefficient and root mean square error between measured and calculated geometrical characteristic parameters of wheat leaf

几何特征参数 Geometrical characteristic parameter	均方根误差 Root mean square error	决定系数 Determination coefficient
叶面积 Leaf area/cm ²	0.49	0.99
叶长 Leaf length/cm	0.57	0.97
叶宽 Leaf width/cm	0.04	0.96

3 讨论

将绿色的叶片与已知尺寸的白色背景结合后进行图像采集,采集后的影像在灰度值等于150时可以明显区分前景与背景,该阈值在背景相似条件下,也具有通用性,可以为类似的图像分割研究提供借鉴。本文中图像背景尺寸已知,使后续以像素数为结果的叶面积、周长、叶长和叶宽与实际尺寸之间的转换成为可能。

在众多叶面积和周长的计算方法中,本文选用统计像素法计算叶面积,采用对叶片边缘像素坐标进行定位,然后累计像素间距离的方法计算叶周长。这2种方法对叶片相应几何参数的计算结果准确度高,且计算过程简单,其中统计像素数法的计算方法灵活,通过与图像分离算法结合可实现对单个小麦叶片叶面积的计算,累计像素间距离的方法则避免了使用链码法追踪边界效率差的问题。这2种方法的选择使计算小麦叶面积和周长的工作效率得到提高,且计算结果的准确性得到了进一步提升。

因为小麦叶片细长但并不完全对称,因此没有选择最小外接矩形法^[22]对小麦叶片长度和宽度进行确定,而是在最小外接矩形法的基础上,寻找小麦叶片上、下、左、右4个方向边界点的坐标,通过计算上边界点与下边界点间的距离求叶长,通过从左边界点和右边界点分别向对边作垂线的方法获取多条线段,以其中最长的线段确定叶宽。这种方法克服了传统测量法中用眼睛目测判断叶片的最宽位置,然后使用直尺或游标卡尺再进行叶宽测量所产生的主观误差,同时该方法也克服了叶片形状对计

算结果的影响,适用于任何形状的小麦叶片。外推该方法,也可以对其他作物,例如大麦、棉花、黄豆、苹果、桃、大枣等叶片的长和宽进行精确计算,这也使得一些作物的叶长、叶宽与叶面积等参数之间函数关系的准确建立成为可能。

4 结论

在已知尺寸的特定背景下,采集离体小麦叶片图像,在图像灰度值为150时可明显区分绿色前景和白色背景。使用本文中计算小麦叶面积、叶长、叶宽的方法计算相应的小麦叶片几何参数,并对计算结果和实测值进行比较,发现叶面积、叶长和叶宽的计算值接近实测值。对计算结果进行统计分析,叶面积、叶长和叶宽的RMSE值分别为0.49 cm²、0.57 cm和0.04 cm, R²值分别为0.99、0.97和0.96,接近0值的RMSE和接近1值的R²进一步肯定了本文中计算小麦叶面积、叶长和叶宽方法的准确性。使用周长算法计算不同规格硬币的周长,以间接验证本文计算小麦叶周长算法的准确性,结果显示计算值接近实测值。因此,采用改进后的方法计算离体小麦叶长和叶宽结果可靠,且不受叶片形状的影响;针对小麦叶片特征,所选计算小麦叶面积和周长方法的结果精度高,适用性好。

参考文献(References):

- [1] LAUBHANN D, ECKMÜLLNER O, STERBA H. Applicability of non-destructive substitutes for leaf area in different stands of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) focusing on traditional forest crown measures. *Forest Ecology and Management*, 2010,260(9):1498-1506.
- [2] PEKSEN E. Non-destructive leaf area estimation model for faba bean (*Vicia faba* L.). *Scientia Horticulturae*, 2007,113(4):322-328.
- [3] 冯冬霞,施生锦.叶面积测定方法的研究效果初报. *中国农学通报*,2005,21(6):150-152.
FENG D X, SHI S J. Research on night measurement methods of leaf area. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005,21(6):150-152. (in Chinese with English abstract)
- [4] DUAN X L, PENG X, QIAO X F, et al. Life cycle and population genetics of bird cherry-oat aphids *Rhopalosiphum padi* in China: An important pest on wheat crops. *Journal of Pest Science*, 2017,90(1):103-116.
- [5] SHI Y Q, CHENG Y H, WANG Y, et al. Investigation of the fungal community structures of imported wheat using high-throughput sequencing technology. *PLoS One*, 2017,12(2):

- e0171894.
- [6] TAO J B, WU W B, ZHOU Y, et al. Mapping winter wheat using phenological feature of peak before winter on the North China Plain based on time-series MODIS data. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017,16(2):348-359.
- [7] 徐义鑫,李凤菊,王建春,等.基于OpenCV的Android手机植物叶片几何参数测量系统.中国农学通报,2015,31(35):236-244.
XU Y X, LI F J, WANG J C, et al. OpenCV-based measurement system for plant leaf geometry parameters using Android mobile phone. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015,31(35):236-244. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈涛涛,迟道才,梁茜,等.基于矩形框几何校正的多叶面积测量方法.农业工程学报,2012,28(8):206-213.
CHEN T T, CHI D C, LIANG Q, et al. Multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box. *Transactions of the CSAE*, 2012,28(8):206-213. (in Chinese with English abstract)
- [9] ROBBINS N S, PHARR D M. Leaf area prediction models for cucumber from linear measurements. *HortScience*, 1987, 22(6):1264-1266.
- [10] KERAMATLOU I, SHARIFANI M, SABOURI H, et al. A simple linear model for leaf area estimation in Persian walnut (*Juglans regia* L.). *Scientia Horticulturae*, 2015,184:36-39.
- [11] O'NEAL M E, LANDIS D A, ISAACS R, et al. An inexpensive, accurate method for measuring leaf area and defoliation through digital image analysis. *Journal of Economic Entomology*, 2002,95(6):1190-1194.
- [12] YESHITILA M, TAYE M. Non-destructive prediction models for estimation of leaf area for most commonly grown vegetable crops in Ethiopia. *Science Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2016,4(5):202-216.
- [13] DOS SANTOS J C C, COSTA R N, SILVA D M R, et al. Use of allometric models to estimate leaf area in *Hymenaea courbaril* L. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2016,28(4):357-369.
- [14] 张万红,姬洪飞,刘勇刚,等.基于Matlab解析数字图像求解苹果叶面积的方法.北方园艺,2017(3):15-18.
ZHANG W H, JI H F, LIU Y G, et al. Measuring leaf area of apple based on analysis of Matlab digital image. *Northern Horticulture*, 2017(3):15-18. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘镛源,王纪华,杨贵军,等.冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较.农业工程学报,2011,27(3):220-224.
LIU R Y, WANG J H, YANG G J, et al. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat. *Transactions of the CSAE*, 2011,27(3):220-224. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周乐前.基于图像的植物叶片参数测量方法研究.长沙:湖南大学,2015:17-19.
ZHOU L Q. Studies on image-based plant leaf parameter measurement. Changsha: Hunan University, 2015:17-19. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘韶军,王库.基于自适应链码的棉种周长测量.计算机应用,2008,28(11):2881-2883.
LIU S J, WANG K. On detection of cotton seed perimeter based on self-adaptive freeman code. *Journal of Computer Applications*, 2008,28(11):2881-2883. (in Chinese with English abstract)
- [18] 谢家龙,李林升,林国湘,等.基于边界跟踪的多连通区域面积和周长的计算方法.电子技术与软件工程,2014(9):119-120.
XIE J L, LI L S, LIN G X, et al. Calculating area and perimeter of connected regions based on tracking boundary. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2014(9):119-120. (in Chinese)
- [19] 汤晓东,刘满华,赵辉,等.复杂背景下的大豆叶片识别.电子测量与仪器学报,2010,24(4):385-390.
TANG X D, LIU M H, ZHAO H, et al. Soybean leaves recognition of images with complicated background. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010,24(4):385-390. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈爱军,李东升,董光辉,等.一种基于MATLAB的植物叶片参数测量系统.中国计量学院学报,2010,21(4):310-313.
CHEN A J, LI D S, DONG G H, et al. A system for plant leaf parameter measure based on MATLAB. *Journal of China University of Metrology*, 2010,21(4):310-313. (in Chinese with English abstract)
- [21] 苑玮琦,胡迪.利用矩实现植物叶片长宽的测量.计算机工程与应用,2013,49(16):188-191.
YUAN W Q, HU D. Measurement of leaf blade length and width based on moment. *Computer Engineering and Applications*, 2013,49(16):188-191. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭斯羽,周乐前,温和,等.长叶柄轴对称植物叶片长度的图像测量方法.电子测量与仪器学报,2015,29(6):866-873.
GUO S Y, ZHOU L Q, WEN H, et al. Image-based length measurement method of axially symmetric plant leaves with elongated petiole. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015,29(6):866-873. (in Chinese with English abstract)
- [23] FREEMAN H, SHAPIRA R. Determining the minimum-area enclosing rectangle for an arbitrary closed curve. *Communications of the ACM*, 1975,18(7):409-413.
- [24] KERN S O, HOVENDEN M J, JORDAN G J. The impacts of leaf shape and arrangement on light interception and potential photosynthesis in southern beech (*Nothofagus cunninghamii*). *Functional Plant Biology*, 2004,31(5):471-480.
- [25] 陈佳悦,姚霞,黄芬,等.基于图像处理的冬小麦氮素监测模型.农业工程学报,2016,32(4):163-170.
CHEN J Y, YAO X, HUANG F, et al. N status monitoring model in winter wheat based on image processing. *Transactions of the CSAE*, 2016,32(4):163-170. (in Chinese with English abstract)