

基于图像分割的苹果叶片几何参数计算

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 针对传统方法和叶面积仪法测定作物叶面积、叶长、叶宽等参数费时费力,成本高等问题,提出苹果叶面积、叶长、叶宽和周长的图像测定法。首先采用颜色空间转换法转换 RGB(红、绿、蓝)图为 HIS(色调、亮度、饱和度)图,并以大津法(Otsu)阈值色调(H)获取二值图像;再根据二值图中苹果叶边缘像素坐标分布特征,计算叶长、叶宽和叶周长,根据苹果叶片像素数计算叶面积;最后对叶长、叶宽和叶面积的计算值与实测值之间进行均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)计算,并以测定硬币周长的方式验证周长算法。结果表明:苹果叶面积、叶长、叶宽的RMSE值分别为0.58 cm²、0.46和0.10 cm, R^2 值分别为0.99、0.93、0.97,测定的1元、5角、1角硬币的周长分别为7.68、6.42和6.10 cm。RMSE取值较小和 R^2 取值较高表明叶面积、叶长和叶宽算法结果可靠,周长算法验证结果表明周长计算值与实测值之间差异较小。

关键词 图像分割; 苹果叶; 叶面积; 周长; 叶长; 叶宽

中图分类号 S661.1

文章编号 1007-4333(2018)08-0101-08

文献标志码 A

Calculating geometrical parameters of apple leaf based on the image segmentation

ZHANG Wanrong

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

Abstract Given that it is a tedious and high cost work to measure area, length, width and other parameters of crop using traditional methods and leaf area meter, a image method for calculating area, perimeter, length and width of apple leaf was proposed in this paper. Firstly, RGB (red, green, blue) image was convert into HIS (hue, intensity, saturation) color space. Secondly, Otsu method of segmentation was applied to implement binaryzation of H color channel. And finally, the perimeter, length and width of apple leaf were determined based on the distribution feature of boundary pixel coordinate of apple leaf and the apple leaf area was calculated by counting the number of apple leaf pixels. In order to prove the rationality of methods, the RMSE and R^2 between the calculated and measured apple leaf area, leaf length and width was calculated and perimeter algorithm was test with the help of estimating the circumference of the different size coins. The results showed that RMSE and R^2 for apple leaf area, leaf length and width were 0.58 cm², 0.46 cm, 0.10 cm, 0.99, 0.93 and 0.97, respectively. And the calculated circumference of one yuan, fifty cents and ten cents of RMB was 7.68 cm, 6.42 cm and 6.10 cm, respectively. The low values of RMSE and high values of R^2 indicated that the result obtained by method of measurement of apple leaf area, leaf length and width were reliable. And the verification results with respect to method of measurement of apple leaf perimeter showed that there were little differences between calculated and true values.

Keywords segmentation of image; apple leaf; leaf area; perimeter; leaf length; leaf width

叶片是植物进行光合作用、蒸腾作用和合成有机物质的主要器官^[1]。叶片几何参数则是植物生长发育、产量形成和品种特性的重要指标,也是植物进

行合理栽培管理以及病虫害发生监测的重要数据支撑^[2]。苹果(*Malus Mill.*)是中国农业部确定的11种优势农产品之一,也是中国第一大果品产业^[3]。

收稿日期: 2017-10-27

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-03)

第一作者: 张万红, 助理研究员, 博士, 主要从事生态模型及影像分割研究, E-mail: zhwhong1022@163.com

准确地测量苹果叶片的长、宽、周长、面积等几何参数,对指导苹果生产及病虫害防治等有重要指导意义。

目前测量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^[4]。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,这些方法操作一般较为繁琐,且其中一些方法得到的结果误差较大^[4-5]。叶面积仪法虽测量精确度较高,但仪器昂贵,维修不方便,不适于过宽和过长叶片的叶面积测量^[4,6]。图像法具有测量精度较高,成本低廉,相对易操作^[4],测定方法受待测目标的特点、测定要求的不同而灵活多变等特征。因此,植物叶片几何特征的测定多以图像法为主。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素数法^[5,7-9],边界链码法和边界坐标计算法。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,像素数法计算植物叶面积的精度比边界链码法和边界坐标计算法较高^[10]。对于植物叶片周长的测定,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^[10-12]。在周长的计算方法中,链码法将像素邻域范围内倾斜方向像素间的距离也进行了计算,计算结果比统计边缘像素数和计算隙码数方法准确率高^[10],但链码法对边界的跟踪效率差,耗时长^[13]。对于叶长和叶宽的测定,大多数测量方法都是通过旋转法^[14-15]求得叶片的最小外接矩形,再将此外接矩形的长和宽作为叶子的长和宽^[16-17],此方法对于细长且对称的叶子测量结果准确率高,对形状不规则的叶子测量结果准确率低^[18]。对于植物叶片几何参数的测定,图像法与其它方法相比具有明显的优势,但在图像法中,常用的测量植物叶长和叶宽的旋转法不适用于形状不规则的叶片,同时对于苹果叶片几何参数的测定,目前的研究多以叶面积测量为主,且研究方法各异。针对苹果叶片的特征(叶缘呈锯齿状,叶片不完全对程,叶片形状呈现为卵状,叶脉呈轻微弯曲)选用合理的图像处理方法对其叶长、叶宽和叶周长的测定鲜有文献报道。

针对上述问题,本研究拟对原有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改进,

并选用合理的周长及叶面积测定方法,以期对苹果叶长、叶宽、周长和叶面积进行准确测定。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

苹果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,地理坐标为东经 107°41',北纬 35°14',属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 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 苹果叶片图像采集

于 2016 年 6 月 7 日将采集到的 30 片苹果叶片平铺且正放在长宽已知的白色背景纸张(25 cm×14 cm)上,在室内自然光照条件下,使用华为荣耀 7 手机,采用自然曝光模式垂直对苹果叶片进行拍照。在图像进行分割处理前,为方便图像处理,在不影响图像中前景与背景形状及颜色的前提下,图像统一变换为 2 482 像素×4 298 像素,并以 JPEG 格式导入计算机。

1.3 图像预处理

在图像预处理阶段选取合适的颜色空间是有效分割目标图像的前提,也关系到图像分割时所采用的算法和策略^[19]。最常见的为 RGB 颜色空间模型,此外还有 HSV、HIS、L* a* b 等颜色空间^[20]。由于 RGB 颜色空间的红(R)、绿(G)、蓝(B)3 个分量之间具有很强的相关性,分离效果并不好,并不适合做图像分割^[21]。但以 RGB 颜色空间的三原色为基础,经过线性或非线性变换可以转换成另外的颜色空间^[22]。HIS 颜色空间是从色调(H)、亮度(I)和饱和度(S)三方面描述图像,比较直观且符合人的视觉特性^[19]。因此,本研究首先将 RGB 颜色空间转换为 HIS 颜色空间后再对目标图像进行分割,转换公式^[23]如下:

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3)$$

式中: θ 为 HIS 颜色空间从红轴开始逆时针旋转的

角度。

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \quad (4)$$

1.4 苹果叶片几何特征提取方法及步骤

本研究计算苹果叶片几何参数算法流程见图 1。

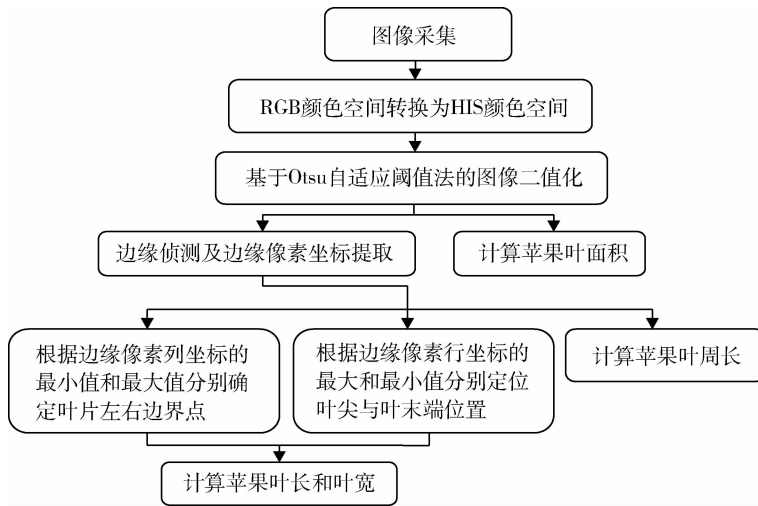


图 1 苹果叶片几何参数算法处理流程

Fig. 1 Flow chart of algorithmic process of calculating geometrical parameters of apple leaf

1.4.1 Otsu 动态阈值法

本研究使用 Matlab(版本为 R2015b)软件中的“graythresh”命令对 HIS 颜色空间的 H 、 I 、 S 颜色分量分别进行大津法(Otsu)阈值化处理^[24]。在 Otsu 阈值化处理图像的基础之上使用“im2bw”命令二值化影像(影像中白色部分为前景,黑色部分为背景),并使用“bwarea”和“bwareaopen”命令清除干扰点。

1.4.2 苹果叶片几何特征提取

1)采用统计像素法计算苹果叶面积。计算公式如下:

$$A = \frac{P_a \times R_a}{P_t} \quad (5)$$

式中: A 为苹果叶面积; P_a 为苹果叶片像素数; P_t 为二值图像像素数; R_a 为二值图像真实面积。

2)采用两点间距离公式计算叶周长。使用 Matlab 中的“bwboudaries”命令提取二值图中苹果叶片边缘像素坐标信息,并利用两点间距离公式^[16]计算相邻像素间距离,对所有像素间的距离值求和,和值与单位像素所代表的真实距离值相乘,乘积为叶周长值,两点间距离公式为:

$$P_e = \sum_k^{N_b} [(C_k - C_{k+1})^2 + (W_k - W_{k+1})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: P_e 为苹果叶片周长; C_k 和 W_k 为苹果叶片边

缘像素坐标; k 为苹果叶片边缘像素; N_b 为边缘像素个数。

3)以最小外接矩形与叶缘的切点为始点向对边做垂线确定叶宽。叶片的最大宽度定义为叶宽^[25],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^[26]。使用 Matlab 中的“regionprops”命令绘制二值图中苹果叶片最小外接矩形,并根据叶边缘像素列坐标值的最小和最大值分别确定外接矩形与叶片的左右切点,以切点为始点做外接矩形长边的垂线,垂线与叶缘的交点为终点,始点与终点间最长的线段长度确定为苹果叶宽。

4)苹果叶长的测定。叶尖到叶末端的距离定义为叶长^[25]。分别根据苹果叶边缘像素行坐标的最大值和最小值确定苹果叶尖和叶末端的位置,并使用 Matlab 中的“imdistline”命令连接叶尖和叶末端,叶尖和叶末端的线段长度即为叶长。

1.5 结果评价

为了对本研究提出的算法进行验证,使用 LI-3100C 便携叶面积(美国 LI-COR 公司)测量目标叶的叶面积、叶长、叶宽,并对测量结果与本研究所使用算法计算结果进行决定系数(R^2)和均方根误差(Root mean square error, RMSE)计算^[27]。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

式中： x_i 为根据本研究算法求取的样本 i 的测量值； \bar{x} 为 x 值的平均值； y_i 为样本 i 的测量值； \bar{y} 为 y 值的平均值； n 为样本数。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

目前,对苹果叶周长的测定未见相关文献报道,因此使用本研究算法对已知周长的硬币进行周长测定,并将测定结果与硬币实际周长值进行比较,以检验周长算法计算结果的可靠性。

2 结果与分析

2.1 RGB 颜色空间转换为 HIS 颜色空间

通过 Matlab 平台,将苹果叶片原始图像(图 2(a))从 RGB 颜色空间转换为 HIS 颜色空间,

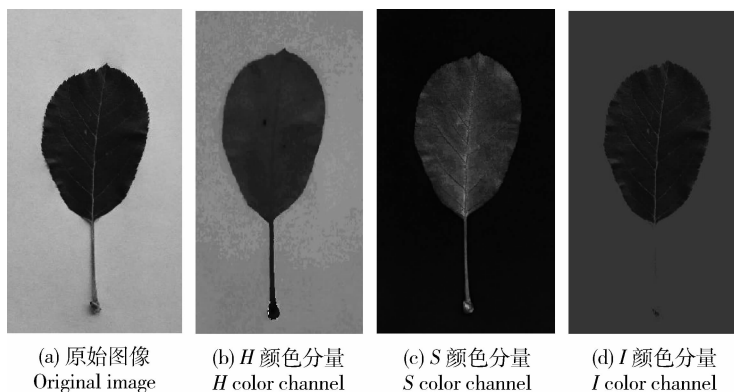


图 2 苹果叶片原始图像及其 H 、 S 和 I 颜色分量图

Fig. 2 The original image of apple leaf and its H , I and S color channel

2.2 基于 Otsu 自适应阈值法的苹果叶片图像二值化

采用 Otsu 自适应阈值法分别对 H 、 I 、 S 各颜色分量图进行阈值化处理,并根据阈值结果分别对以上 3 个颜色分量进行二值化(图 3)。经过二值化处理, H 颜色分量图叶片轮廓清晰,叶片外形结构无缺失,图像噪声小(图 3(a)); S 颜色分量二值化图中叶片有孔洞,图像噪声大,叶柄与叶片连接处被细化,叶缘有较大锯齿状缺刻(非正常的叶缘锯齿结构)(图 3(b)); I 颜色分量图中,叶柄结构有缺失,主叶脉显示清晰,叶缘结构有残缺,图像也呈现较大的噪声(图 3(c))。

并提取 H 、 I 、 S 颜色分量。观察各颜色分量图, H 颜色分量前景(苹果叶片)与背景区分明显,苹果叶片、叶柄及叶缘无残缺且形状、色泽清晰可辨,叶颜色均一性好,但图中叶脉结构模糊不清(图 2(b)); S 颜色分量图显示了较清晰的苹果叶外形轮廓,叶片颜色均一性差,叶脉呈现为较亮的浅色,叶缘部分有轻微的不连续浅色区域镶嵌在叶片深色区域中,在叶缘与主叶脉之间的区域中有零星的浅色亮斑,图中叶柄结构清晰,但叶柄靠近叶基处的部分结构被轻微细化(图 2(c)); I 颜色分量图中,叶柄大部分结构缺失,叶脉结构较清晰,叶缘部分颜色一致性差,在主叶脉与叶缘之间的区域有浅色斑点存在(图 2(d))。

准确计算苹果叶面积、周长、叶宽和叶长为本研究的主要目标,而选择轮廓清晰,外形结构无缺失,图像噪声小的苹果叶片二值图则是实现上述准确计算的保证,因此分别对 H 、 I 、 S 颜色分量图进行二值化处理并选择适用于图像几何特征计算的二值图为后续图像处理目标图。

本研究中,前景的唯一性以及其结构的完整性是准确计算苹果叶面积、周长、叶长和叶宽的前提。为了实现苹果叶片二值图中前景物的唯一性,图像进行除噪,并使用 matlab 中的“imfill”命令对图像中的孔洞进行填充,以恢复图像结构,使苹果叶片成为图像中唯一具有完整结构的前景物。 H 颜色分量二值图经过除噪以及孔洞填充后,图中肉眼不易察觉的细小干扰点已被清除,清除干扰点后的图像完整,轮廓清晰(图 3(d))。 S 颜色分量二值图经过除噪及孔洞填充后苹果叶缘仍有部分缺失不能被恢复(图 3(e))。 I 颜色分量二值图则经过孔洞填充和

除噪后前景叶柄完全消失,叶缘缺失严重,叶脉结构在叶片中呈现为黑色,原有的叶片结构破坏严重

(图 3(f))。综合上述,选取图 3(d)为后续苹果叶几何特征计算目标图。

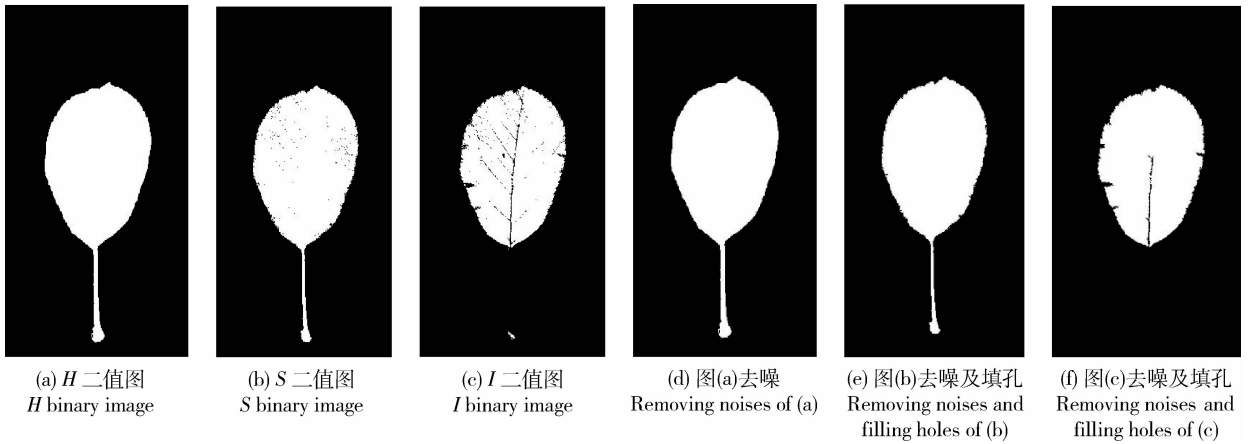


图 3 苹果叶片 H、S、I 颜色分量二值图去噪及孔洞填充

Fig. 3 The removing noises and filling holes of binary images of H, S and I color channel

2.3 苹果叶面积、周长、叶宽及叶长的计算

以苹果叶片二值图为基础,进行相应图像处理。图 4 为苹果叶宽、叶长和叶周长计算过程中所涉及的关键图像处理,其中图 4(a)中红色矩形框为苹果叶片二值图的最小外接矩形,蓝色的线段为从切点出发到对边的垂线,线段中的数字为叶宽像素值,图 4(b)蓝色线段中镶嵌的数字为叶长像素值,图 4(c)中苹果叶片边缘封闭的红色曲线为提取的苹果叶边缘信息。

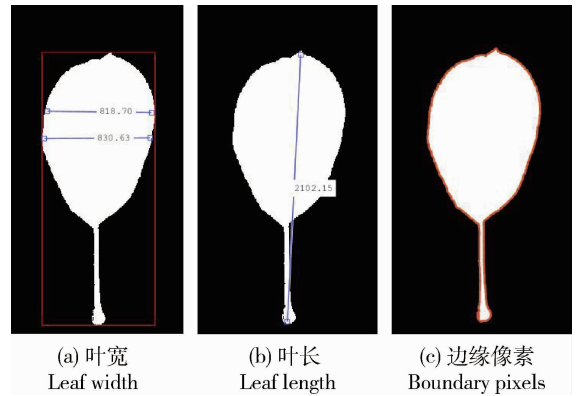


图 4 苹果叶宽、叶长的计算以及其边缘像素的提取
Fig. 4 Calculating apple leaf width and length and extracting of boundary pixels of apple leaf

在图像处理的基础上,对苹果叶面积、叶长和叶宽分别进行计算,并做图比较计算结果与测量值之间的关系:叶面积计算值与测量值紧贴 1 : 1 线分布,表明测量值与计算值之间差异较小,计算值可以反映真实的苹果叶面积变化(图 5(a));叶长计算值

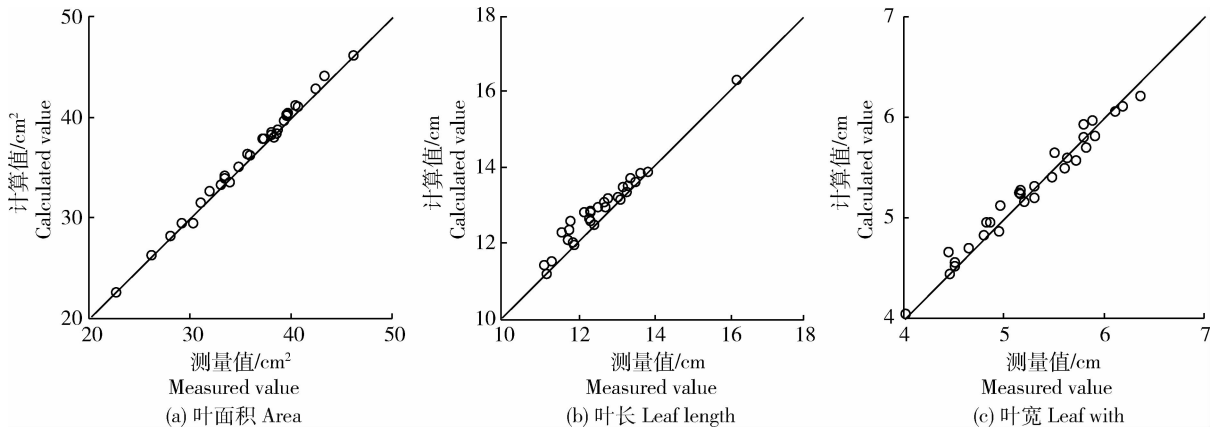


图 5 苹果叶面积、叶长和叶宽的测量值与计算值关系

Fig. 5 The relationship between calculated and measured apple leaf area, leaf length and leaf width

与测量值紧密围绕在 1:1 线以上排列,表明测量值小于计算值,但两者之间差异较小(图 5(b));叶宽计算中,计算值与测定值则在 1:1 线两侧且靠近 1:1 线进行分布,表明计算值接近真实值(图 5(c))。评价计算结果,叶面积、叶长和叶宽的均方根误差分别为 0.58 cm²、0.46 和 0.10 cm,决定系数分别为 0.99、0.93、0.97,较小的 RMSE 值和高的 R² 值表明计算结果可靠。

由于目前未见测定苹果叶片周长的方法报道^[4],因此对苹果叶片周长的计算结果采用间接方法进行验证。验证结果显示,使用本研究算法分别计算 1 元、5 角和 1 角硬币的周长,其计算值分别为 7.68、6.42 和 6.10 cm,真实值分别为 7.85、6.28 和 5.97 cm,计算值与真实值接近。

3 讨论

以白色已知面积的纸张作为离体苹果叶片的背景进行图像采集,采集后的图像背景单一,前景与背景颜色差异较大,使采用阈值法准确分割前景成为可能。考虑到 HIS 颜色空间更符合人体的视觉特征,在图像预处理阶段,将 RGB 颜色空间转换为 HIS 颜色空间,并选择 H 颜色分量二值图作为后续苹果叶片几何参数计算目标图,该图边缘清晰,结构完整,使后续准确计算苹果叶面积、周长、叶长和叶宽成为可能。同时,以 Otsu 自适应阈值法对图像进行阈值化处理,减少了人为选择阈值过程中所产生的主观误差,提高了图像分割效率。

在苹果叶周长的计算过程中,根据像素 8 邻域的特点,垂直和水平方向相邻像素间的距离为 1,在斜方向,相邻两个像素间的距离为 1.414^[12],因此统计苹果叶边缘的像素数,并以单位像素数所代表的实际距离为依据计算苹果叶周长的算法会产生一些误差。基于此考虑,本研究在提取苹果叶边缘像素的基础上,确定叶边缘像素在图像中的坐标,然后采用计算两点间距离的算法计算苹果叶周长,该算法对水平、垂直、斜向方向的像素间距离均进行了计算,算法精度高。

基于旋转法^[15,28-29]在测量叶长和叶宽过程中存在的局限^[17,30],对其进行改进。改进后的方法充分考虑了苹果叶片外形不规则,结构不完全对称的特征。与传统方法相比,改进后的方法能准确对苹果叶最宽部位进行判定,其计算叶长和叶宽的方法适用于任何形状的苹果叶片。

对本研究的叶长计算结果进行分析,叶长计算值略高于实测值(图 5(b))。计算值略高于实测值的原因是因为采用 LI-3000C 叶面积仪测量苹果叶长时,人手指捏住叶柄拖拉苹果叶片通过叶面积仪分析器时,叶柄被人手指拿捏的部位没有被测定,因此计算值略高于实测值。

4 结论

本研究在特定的背景下选用 Otsu 阈值法对 H 颜色分量进行二值化处理,H 颜色分量二值化图呈现了完整的苹果叶缘结构。以图像分割为基础,改进最小外接矩形确定叶长和叶宽的算法,改进后的算法不受苹果叶子形状的影响,计算结果准确率高。周长算法基于苹果叶缘呈现为锯齿状且叶缘像素间并不完全呈直线排列的特征,使用两点间距离公式对苹果叶缘相邻像素间的距离进行计算并对计算结果求和,该方法计算过程简单,计算结果可靠。对苹果叶面积的计算则选用计算结果准确率较高的像素数法进行。因此,改进后的叶长和叶宽算法,以及针对苹果叶片特征选用的叶面积和周长算法适用于对苹果叶片几何参数的准确计算,方法实用性强。

参考文献 References

- [1] 张文昭,洪添胜,吴伟斌,刘志壮,郭灼,冷令. 基于图像处理技术的叶面积检测研究[J]. 农机化研究,2007(4):120-124
Zhang W Z, Hong T S, Wu W B, Liu Z Z, Guo Z, Leng L. Advances of leaf area determination based on image processing technology [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(4):120-124 (in Chinese)
- [2] 冯冬霞,施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报[J]. 中国农学通报,2005,121(6):150-152,155
Feng D X, Shi S J. Research on night measurement methods of leaf area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 121(6):150-152,155 (in Chinese)
- [3] 王海波,李林光,陈学森,李慧峰,杨建明,刘嘉芬,王超. 中早熟苹果品种果实的风味物质和风味品质[J]. 中国农业科学,2010,43(11):2300-2306
Wang H B, Li L G, Chen X S, Li H F, Yang J M, Liu J F, Wang C. Flavor compounds and flavor quality of fruits of mid-season apple cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11):2300-2306 (in Chinese)
- [4] 徐义鑫,李凤菊,王建春,花登峰,张雪飞,吕雄杰,钱春阳. 基于 OpenCV 的 Android 手机植物叶片几何参数测量系统[J]. 中国农学通报,2015,31(35):236-244

- Xu Y X, Li F J, Wang J C, Hua D F, Zhang X F, Lv X J, Qian C Y. OpenCV: Based measurement system for plant leaf geometry parameters using Android mobile phone[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31 (35): 236-244 (in Chinese)
- [5] 陈涛涛, 迟道才, 梁茜. 基于矩形框几何校正的多叶面积测量方法[J]. *农业工程学报*, 2012(8): 206-213
Chen T T, Chi D C, Liang Q. Multi leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012(8): 206-213 (in Chinese)
- [6] O'neal M E, Landis D A, Isaacs R. An inexpensive, accurate method for measuring leaf area and defoliation through digital image analysis[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2002, 95 (6): 1190-1194
- [7] 高祥斌. 图像处理技术在室内观叶植物叶面积测量中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(34): 16814-16815
Gao X B. Application of image processing technology in leaf area measurement of indoor leaf: Viewed plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(34): 16814-16815 (in Chinese)
- [8] 刘镛源, 王纪华, 杨贵军, 黄文江, 李伟国, 常红, 李小文. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (3): 220-224
Liu R Y, Wang J H, Yang G J, Huang W J, Li W G, Chang H, Li X W. Comparison of ground-based LAI measuring methods on winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 220-224 (in Chinese)
- [9] 石剑飞, 殷珊珊, 冷锁虎, 左青松. 采用数码图像处理法测定油菜叶面积的方法探讨[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(3): 379-382
Shi J F, Yin C Y, Leng S H, Zuo Q S. Digital image method for rape seed leaf area measure[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32(3): 379-382 (in Chinese)
- [10] 周乐前. 基于图像的的植物叶片参数测量方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015
Zhou L Q. Studies on image-based plant leaf parameter measurement [D]. Changsha: Hunan University, 2015 (in Chinese)
- [11] 韩殿元. 基于链码的圆形目标分析[J]. *潍坊学院学报*, 2008, 8 (2): 34-36
Han D Y. An analysis on circle object based on chain code[J]. *Journal of Weifang University*, 2008, 8 (2): 34-36 (in Chinese)
- [12] 刘韶军, 王库. 基于自适应链码的棉种周长测量[J]. *计算机应用*, 2008, (11): 2881-2883
Liu S J, Wang K. On detection of cotton seed perimeter based on self-adaptive freeman code[J]. *Computer Applications*, 2008, 28(11): 2881-2883 (in Chinese)
- [13] 谢家龙, 李林升, 林国湘. 基于边界跟踪的多连通区域面积和周长的计算方法[J]. *电子技术与软件工程*, 2011, 119-120
Xie J L, Li L S, Lin G X. Calculating the area and perimeter of connected regions based on tracking boundary [J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2011, 119-120 (in Chinese)
- [14] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 509-514
Lin Y C, Cui Y P, Huang Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 509-514 (in Chinese)
- [15] 汤晓东, 刘满华, 赵辉, 陶卫. 复杂背景下的大豆叶片识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(4): 385-390
Tang X D, Liu M H, Zhao H, Tao W. Soybean leaves recognition of images with complicated background [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24 (4): 385-390 (in Chinese)
- [16] 陈爱军, 李东升, 董光辉. 一种基于 MATLAB 的植物叶片参数测量系统[J]. *中国计量学院学报*, 2010, 21(4): 310-313
Chen A J, Li D S, Dong G H. A system for plant leaf parameter measure based on MATLAB[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2010, 21(4): 310-313 (in Chinese)
- [17] 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, 231
Yuan W Q, Hu D. Measurement of leaf blade length and width based on moment [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(16): 188-191, 231 (in Chinese)
- [18] 郭斯羽, 周乐前, 温和. 长叶柄轴对称植物叶片长度的图像测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(6): 866-873
Guo S Y, Zhou L Q, Wen H. Image-based length measurement method of axially symmetric plant leaves with elongated petiole [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(6): 866-873 (in Chinese)
- [19] 庞晓敏, 闵子建, 阚江明. 基于 HSI 和 LAB 颜色空间的彩色图像分割[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2011, 36(6): 976-980
Pang X M, Min Z J, Kan J M. Color image segmentation based on HSI and LAB color space [J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2011, 36(6): 976-980 (in Chinese)
- [20] 罗陆锋, 邹湘军, 王成琳, 陈雄, 杨自尚, 司徒伟明. 基于轮廓分析的双串叠贴葡萄目标识别方法[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (6): 15-22
Luo L F, Zou X J, Wang C L, Chen X, Yang Z S, Situ W M. A recognition method for two overlapping and adjacent grape clusters based on image contour analysis[J]. *Transactions of*

- the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 15-22 (in Chinese)
- [21] 张洪超, 侯德文. 一种基于 HIS 颜色空间的分割复杂背景图像算法[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2015, 30(3): 49-52
Zhang H C, Hou D W. An image segmentation algorithm with complex background based on his color space[J]. *Journal of Shandong Normal University: Natural Science*, 2015, 30(3): 49-52 (in Chinese)
- [22] Wei X Q, Jia K, Lan J H, Li Y W, Zeng Y L, Wang C M. Automatic method of fruit object extraction under complex agricultural background for vision system of fruit picking robot [J]. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(19): 5684-5689
- [23] Ballard D H, Brown C M. *Computer Vision* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982: 32-33
- [24] 张武, 黄帅, 汪京京, 刘连忠. 复杂背景下小麦叶部病害图像分割方法研究[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(7): 1349-1354
Zhang W, Huang S, Wang J J, LIU L Z. A segmentation method for wheat leaf images with disease in complex background. *Computer Engineering and Science*, 2015, 37(7): 1349-1354 (in Chinese)
- [25] 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* [J]. *Functional Plant Biology*, 2004, 31(5): 471-480
- [26] Freeman H, Shapira R. Determining the minimum: Area enclosing rectangle for an arbitrary closed curve [J]. *Communications of the Acm*, 1975, 18(7): 409-413
- [27] 陈佳悦, 姚霞, 黄芬, 刘勇, 于琪, 王妮, 徐焕良, 朱艳. 基于图像处理的冬小麦氮素监测模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 163-170
Chen J Y, Yao X, Huang F, Liu Y, Yu Q, Wang N, Xu H L, Zhu Y. N status monitoring model in winter wheat based on image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(4): 163-170 (in Chinese)
- [28] 苏玉梅. 植物叶片图像分析方法的研究与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2007
Su Y M. Study and realization of analyzing methods of plant leaf image [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007 (in Chinese)
- [29] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 509-514
Lin Y C, Cui Y P, Huang Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 509-514 (in Chinese)
- [30] 胡迪. 植物叶片测量方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011
Hu D. Research methodology of plant leaf measurement [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春