

基于矩形框几何校正的多叶面积测量方法

陈涛涛¹, 迟道才^{1*}, 梁茜²

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学水稻所, 沈阳 110866)

摘要: 为了弥补逐片测量和图片倾斜失真的局限性, 该文提出了一种基于矩形框几何校正多叶面积测量方法 (简称为 GCCA)。GCCA 法应用 Hough 变换提取矩形框, 对图像进行几何校正, 利用连通域扫描实现了多叶片同时测量。同时还利用 Visual Basic 2010 对 GCCA 法进行了软件开发, 并与坐标纸法、长宽系数法、Photoshop 法进行了试验比较。试验结果表明: GCCA 法是一种稳定性较高、相关性较好、适用范围较广的叶面积测量方法; 它继承了数字摄影图像处理法的优势, 是一种快速的植物叶面积测定方法。其测量速度随着单张图片叶片数量的增大而提高。软件的编制, 可消除人为因素的影响, 大大提高叶面积测量软件的互动性和通用性。GCCA 法既可以应用于室内, 也可以进行室外无损测量, 为叶面积的测量提供了切实可行的新途径。

关键词: 测量, 图像处理, 几何学, 叶面积, 程序设计, 连通域扫描

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.08.032

中图分类号: S279.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-08-0206-08

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, 28(8): 206-213.

Chen Taotao, Chi Daocai, Liang Qian. Multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 206-213. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叶片是植物重要的光合器官, 也是植物进行蒸腾的主要场所, 其面积大小对植物的生长发育、作物产量以及栽培管理都具有十分重要的意义^[1-5]。近年来快速、准确地计算叶面积越来越受到人们的关注。传统的叶面积测量方法有坐标纸法、复印称质量法和叶面积仪法等。坐标纸法和复印称质量法结果稳定, 但工作量大, 操作复杂, 应用不广。叶面积仪测量法速度快, 但其价格昂贵, 维修不方便, 测量精度受作物群体结构影响较大, 并且不适于过长过宽的叶片面积测量^[6]。随着计算机技术的发展, 利用像素点进行叶面积测定的数字摄影图像处理法得到了迅速的发展。自由路等^[7]提出用数码相机和图像处理软件 (Photoshop) 测量植物叶面积的方法。该方法速度较快、操作灵活, 但要求操作者对 Photoshop 软件要有一定程度的了解。左欣等^[8]提出了参照矩形框对叶片图像进行几何校正的叶面积测量方法, 较大地提高了测量的精度, 但每次只能测量一片叶子, 工作量大。马彦平^[9]等提出植物多叶片图像目标识别和叶面积测量方法, 实现了多叶面积同时测量, 速度快、精度高, 但对图片

要求较高, 对于一般倾斜失真图片的叶面积测量误差较大。为了继承并有机地结合 Photoshop 法操作灵活、几何校正法测量精度高和连通区域扫描法多目标同时测量的优点, 本文拟提出既能实现多叶片同时测量, 又保证较高的叶面积测量精度的一种基于矩形框几何校正多叶面积测量方法, 并进行软件开发, 以期减小叶片测量工作量, 提高叶面积测量的互动性和通用性, 为叶面积的测量提供切实可行的新途径。

1 原理与方法

1.1 原理

数字图像由一个个像素点组成, 经过几何校正后每一个像素代表一定大小的真实表面, 若图像中有已知面积的参考物, 则能通过比例关系计算出目标面积^[9]。对于多个目标, 可以通过连通域扫描方法分别统计出每个连通域的像素数, 实现多个目标面积的测量。GCCA 算法主要过程如图 1 所示。

1.2 灰度化

彩色图片每个像素点分别对应红、绿、蓝 3 个分量, 在数据处理过程中很不方便, 所以在计算机领域中通常将彩色图像灰度化, 再进行图片处理^[10]。不同的红绿蓝 (RGB) 空间, 灰阶的计算公式有所不同。RGB 空间灰度化方法两种常见的形式为

$$gray_1 = \sqrt[3]{k_1 R^\gamma + k_2 G^\gamma + k_3 B^\gamma} \quad (1)$$

$$gray_2 = k_4 R + k_5 G + (1 - k_4 - k_5) B \quad (2)$$

式中, γ 为 RGB 空间灰度系数; k_1 、 k_2 、 k_3 为式 (1) 中 R 、 G 、 B 的权值; k_4 、 k_5 为式 (2) 中 R 、 G 的权值; $gray_1$ 、 $gray_2$ 为灰度化后的灰度值。

收稿日期: 2011-07-03 修订日期: 2012-03-23

基金项目: 辽宁省重大项目 (2008NY01); 辽宁省自然科学基金项目 (20082122)

作者简介: 陈涛涛 (1986-), 男, 湖北黄冈人, 主要从事灌溉排水理论与技术的研究, 沈阳 沈阳农业大学, 110866。

Email: ctt.syau.china@hotmail.com

*通信作者: 迟道才 (1964-), 男, 辽宁大连人, 教授, 主要从事灌溉排水理论与技术的研究。沈阳 沈阳农业大学, 110866。

Email: daocaichi@vip.sina.com

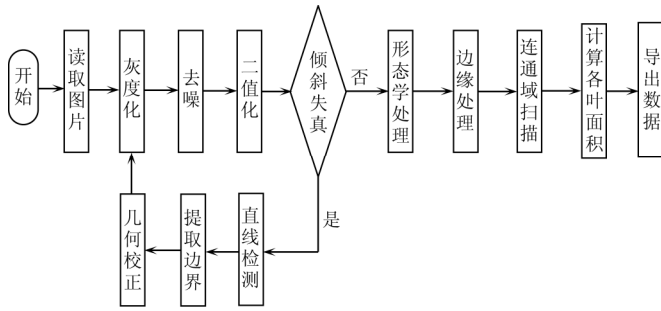


图 1 基于矩形框几何校正的多叶面积测量算法(GCCA)主要过程
Fig.1 Main process of multi-leaf area measurement method (GCCA) based on geometric correction with rectangular box

在叶面积测量过程中，常常会遇到某种作物或作物

某些生育期叶片颜色和背景颜色相似的问题，仅仅用一种固定的灰度化方法并不能有效保留边缘的结构信息。因此本文采用了简化 sRGB IEC61966-2.1 [gamma=2.20]、Adobe RGB (1998) [gamma=2.20]、Apple RGB [gamma=1.8]、ColorMatch RGB [gamma=1.8]、简化 KODAK DC Series Digital Camera [gamma=2.2]、R、G、B 和自定义分配等 9 种常见 RGB 空间灰度化方法（表 1），可根据不同叶片颜色和背景颜色选择不同的方法，弥补了单一灰度化方法的缺陷性，分割效果良好。由于人眼对绿色的敏感度最高，对红色的敏感度次之，对蓝色的敏感度最低，在灰度值等于 $0.3R+0.59G+0.11B$ 时灰度化效果较好^[10]，GCCA 法选择灰度值等于 $0.3R+0.59G+0.11B$ 的自定义方法为默认灰度化方法。

表 1 常见的 RGB 空间灰度化方法
Table 1 Common gray method of RGB space

| 灰度化方法 | 参数 |
|---|--|
| 简化 sRGB IEC61966-2.1 [gamma=2.20] | $\gamma=2.2, k_1=0.2126, k_2=0.7152, k_3=0.0722$ |
| Adobe RGB (1998) [gamma=2.20] | $\gamma=2.2, k_1=0.2973, k_2=0.6274, k_3=0.0753$ |
| Apple RGB [gamma=1.80] | $\gamma=1.8, k_1=0.2446, k_2=0.6720, k_3=0.0833$ |
| ColorMatch RGB [gamma=1.8] | $\gamma=1.8, k_1=0.2750, k_2=0.6581, k_3=0.0670$ |
| 简化 KODAK DC Series Digital Camera [gamma=2.2] | $\gamma=1.8, k_1=0.2229, k_2=0.7175, k_3=0.0595$ |
| R | $k_4=1, k_5=0$ |
| G | $k_4=0, k_5=1$ |
| B | $k_4=0, k_5=0$ |
| 自定义分配法 | $k_1 \geq 0, k_3 \geq 0, k_4+k_5 \leq 1$ |

注：默认情况下，GCCA 法选择自定义分配方法为灰度化方法，其中自定义方法的参数 $k_4=0.3, k_5=0.59$ 。

在曝光不足或过度的情况下，图像灰度可能局限在一个很小的范围内，这将产生一个模糊不清的图像^[11]，可以通过灰度变换对灰度级灰度进行扩展，有效地改善图像的视觉效果。灰度变换是根据某种目标条件按一定变换关系逐点改变原图像中每一个像素灰度值的方法，主要针对独立的像素点进行处理，通过改变原始图像数据所占据的灰度范围而使图像在视觉上得到良好的改观，同时使边界区更为明显，便于后续处理。本文采用直方图均衡化来增强图像。直方图均衡的基本思想是在图像中像素个数多的灰度级进行展宽，而对像素个数少的灰度级进行缩减，从而达到清晰图像的目的，而且这种方法对于背景和前景都太亮或者太暗的图像非常有^[12]。离散图像的变换函数转换关系为

$$GrayValue(z) = Ceiling\left(\left(\sum_{i=0}^{z-1} \frac{n_i}{N}\right) \times 256\right) - 1 \quad (3)$$

式中， $GrayValue(z)$ 表示第 z 个像素点的灰度值； n_i 表示灰度值为 i 的像素个数； N 表示图像总像素数； $Ceiling(X)$ 函数能获取大于或等于 X 的最小整数。

1.3 中值滤波去噪

由摄像头获得的图像经过 A/D 转换、线路传送都会产生“噪声”^[11]，因此在进行二值化之前改善图像，必须进行降噪处理。污染图像去噪的目的就是减少和消除图像中的“噪音”，改善图像质量，以利于对图像特征进行分析^[13]。中值滤波法消除噪声，是通过查看某一像素 3×3 领域内 9 像素的灰度，按照从小到大的顺序排列，

然后用排序后的中间值代替此像素的灰度值，从而达到消除噪声的目的。在去噪过程中，噪声被消除了，而边缘完好保留，在条纹不多时效果更加突出。因此，中值滤波法是噪声消除的最有效方法^[14]。

1.4 二值化

二值化是基于阈值的图像分割，根据灰度值区分图形和背景^[15]。在二值化图像时，把大于某个临界灰度值的像素灰度设为灰度极大值，把小于这个值的像素灰度设为灰度极小值，从而实现二值化。根据阈值选取的不同，二值化的算法分为固定阈值法和自适应阈值法。常用的二值化法有最大类间方法差、迭代法和最大熵阈值法等^[16]。本文分别采用了天津法(OTSU)法、迭代法和手动选择法三种方法，根据实际情况具体选择，基本能够准确地将叶片和背景进行分离。OTSU 法选取出来的阈值非常理想，各种情况下的表现都较为良好^[17]。其最大优点就是稳定性好。迭代法算法对直方图分布成双峰或者分布比较均匀时效果比较好，但对直方图分布比较窄或分布不呈双峰的图像，分割效果往往不理想^[18]。通过程序测试发现，OTSU 法比迭代法稍快，而迭代法在直方图分布成双峰情况下分割效果较好，但一般情况下不够稳定。因为某些特定图像，迭代过程中微小数据的变化甚至会引起分割结果的巨大变化，导致分割失效，这是由于非线性迭代系统对初始条件的敏感性，即俗称的“蝴蝶效应”造成的^[18]。手动算法是通过观察直方图，用鼠标点选方式选择分割阈值。该方法可以根据灰度直方图

实际情况, 自行选择阈值。其优点是可靠性强, 多数情况都能使用, 但手动操作需要一定的经验。在特殊情况下, 这种方法可以用来弥补前两种方法的不足。

1.5 几何校正

由于利用数码相机采集的现场图像大都出现倾斜失真现象, 为了能更好地反映图像的真实情况, 需要对图像进行几何失真校正^[19]。几何校正的主要思想是根据畸变图像中 4 个像素与他们的实际 4 个对应点的函数关系, 对畸变图所有像素点进行纠正, 再对空缺像素进行灰度插值, 从而实现几何校正。几何校正的第一步是应用 Hough 变换^[20-22]提取参考矩形框的 4 条边, 并求出这 4 条边之间的交点坐标找到 4 个控制点, 然后根据控制点与实际矩形框 4 个顶点的对应关系求出变换方程, 并采取灰度插值来校正叶片图像。设畸形图像中的 4 个控制点坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) , 实际坐标分别为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) 、 (X_4, Y_4) , 他们的映射关系如公式 (4)。根据公式 (4), 求出各系数, 确定映射关系。但经过试验对比发现, 直接按照这种映射关系校正图像中所有像素时, 生成的图像可能出现异常大或异常小的情况, 导致 GCCA 法误差过大或失败的现象。因此, 本文提出了一种对公式 (4) 确定映射关系进行缩放控制的方法, 如公式 (5), 校正后图像像素坐标为 (X, Y) 。

$$\begin{cases} X_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i \\ Y_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_iy_i \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X = A(a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy) + B_w \\ Y = A(b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy) + B_h \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_i 、 b_i 分别为系数 ($i=1, 2, 3, 4$); $A = \min\left\{\frac{w_p}{w_r}, \frac{h_p}{h_r}\right\}$

为缩放比例, $B_w = (w_p - Aw_r)/2$, $B_h = (h_p - Ah_r)/2$ 为水平、垂直平移距离, 像素; h_p 、 w_p 拍照的图像的长和宽, 像素。 w_r 、 h_r 矩形框的实际长和宽, mm。

由于校正图像中的像素点映射到畸变图像中不一定是整数位置, 所以有的像素点会找不到对应的像素位置或出现部分像素缺少的现象。为此, 需要对这些空缺像素进行灰度插值。常用的插值算法有最临近插值法、3 次卷积内插法和双线性插值法等^[23]。本文采用双线性插值法为几何校正后的插值方法, 因为双线性插值法^[24]精度和计算复杂度适中。

1.6 形态学处理

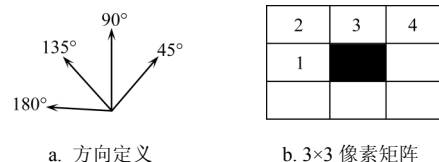
在灰度图二值化后, 二值图目标区域常常出现大量的细空隙或目标边缘不连续的情况, 这种情况通常需要寻找填充空隙的方法。形态学中的闭运算^[25]恰好能满足这种要求。闭运算是先膨胀后腐蚀的过程, 通常用来填充物体内部细小空洞、连接邻近物体和平滑其边界^[26], 同时并不明显改变其面积。GCCA 法类似闭运算, 通过 3×3 领域 9 像素的正方形和二值图目标区域进行“与”操作, 当结果为真的次数大于为否的次数时, 则用目标像素将当前像素填满, 否则不处理。

1.7 边缘处理

图像经灰度化、二值化后, 相片边缘有时被误当成目标区域, 这通常是由于相机边缘采光不够造成的。为了提高测量的精度, 必须对相片边缘进行处理。为此, 本文采用连通域扫描的方法(见 1.8 节)来剔除相片边缘。具体方法是通过连通域扫描, 依次将与边缘相连的连通域所对应的标签设为 1, 等扫描操作完成之后, 将标签为 1 的所有像素点设为背景色。这种方法特别有效, 能很好地清除边缘无效区域。

1.8 连通域扫描

二值图像中, 连通域扫描是图像处理和分析中非常重要的一个预处理过程, 有着广泛的应用领域^[27]。本文运用连通域扫描, 对相片边缘进行处理与小颗粒剔除, 并完成对目标区域像素的统计任务, 这也是多叶片面积测量的关键。连通域算法的步骤为: 首先规定扫描方向, 将 180° 、 135° 、 90° 、 45° 4 个方向上每一个像素点分别定义为 1、2、3、4, 如图 2a。在像素矩阵(图 2b)中黑色方格为当前像素, 1、2、3、4 为 180° 、 135° 、 90° 、 45° 4 个方向上相邻像素点。按照这种定义, 从左到右、从上到下逐像素沿着 1、2、3、4 方向扫描。为了提高效率可以先判断当前像素是否为目标像素(假设灰度值等于零的像素为目标像素), 若为目标像素, 则开始扫描, 否则跳过。在扫描过程中, 找出 1、2、3、4 方向上像素灰度值为零的像素点, 接着找到这些点中标签值最小的像素 (P_{min}), 并把大于 P_{min} 标签值的像素所属连通域所有标签都改成 P_{min} 标签值, 最后再将当前点标签改成 P_{min} 标签值。



注: 1、2、3、4 为 180° 、 135° 、 90° 、 45° 4 方向上的相邻像素, 黑色方格为当前像素。

图 2 连通域扫描方向定义

Fig.2 Definition of connected regions scanning direction

1.9 面积计算

根据连通域扫描统计结果, 目标区域面积用式 (6) 计算

$$\begin{aligned} A_{ii} &= \frac{A_r}{N_r} \times N_{ii} \\ N_r &= A^2 w_r h_r \end{aligned} \quad (6)$$

式中, A_{ii} 为第 i 片叶片面积(扫描目标), mm^2 ; A_r 为实际矩形框的面积, mm^2 ; N_r 为原图像缩放控制后的参考区域, 即矩形框和矩形框内部的像素总数; N_{ii} 为第 i 片叶片像素总数, 即连通域扫描后叶片所对应连通域的像素个数; i 为叶片编号。

2 软件开发

2.1 开发背景与运行环境介绍

为了体现 GCCA 法既实现多叶片同时测量, 又保证

较高的叶面积测量精度，本文基于 Visual Basic 2010 对 GCCA 算法进行软件开发，软件名为“LAS”。开发环境为 Visual Studio 2010，运行环境为 Window XP/Window 2003/Window7，.NET Framework4。

2.2 软件开发

根据上述 GCCA 算法，应用 Visual Basic 2010 开发环境，开发了具有交互式界面的 GCCA 算法的动态仿真模型软件 LAS，见图 3。LAS 可分为图片读取、灰度化、去噪、二值化、几何校正、形态学处理、边缘校正、多目标识别、叶面积统计与计算和打印结果输出数据 11 个功能块，数据预处理、几何校正、连通域扫描和叶面积计算与输出 4 个主要步骤。

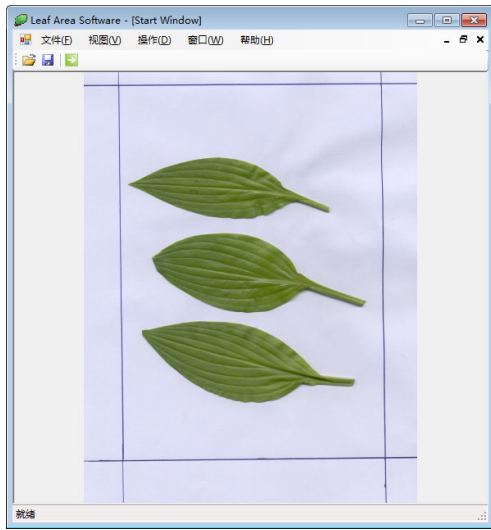


图 3 LAS 软件主界面图

Fig.3 Main interface diagram of LAS software

1) 数据预处理。采用.NET Framework 类库中 LockBits 函数实现内存锁定，并返回 BitmapData 类型数据进行图像数据的快速操作；采用自定义法为默认灰度方法，灰度值为 $0.3R+0.59G+0.11B$ ，见图 4；采用式 (3) 为灰度变换方法，经灰度变换得到效果图 5a，重新统计出灰度直方图并进行插值处理，得到光滑的直方图，见图 5b；采用中值滤波法去噪；采用 OTSU 法、迭代法和手动选择法为灰度图二值化方法，以实现目标区域与背景区域的分离的目的。

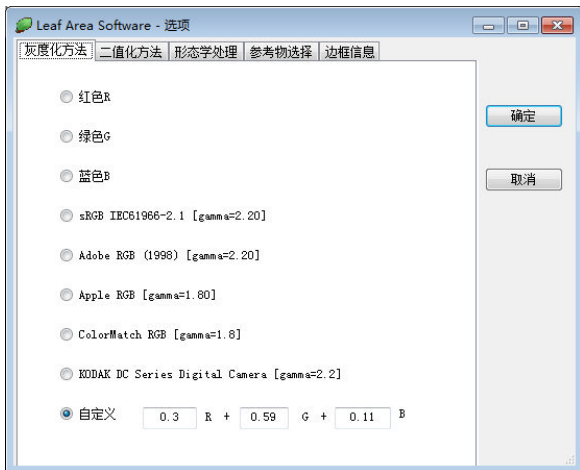
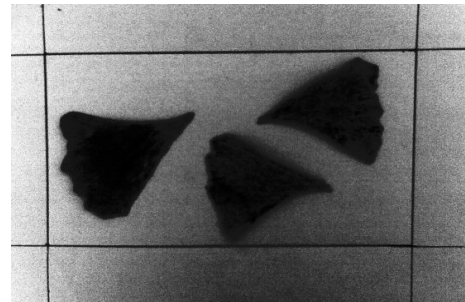


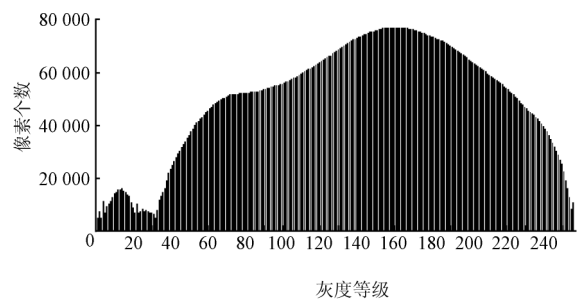
图 4 灰度化方法程序界面图

Fig.4 Interface diagram of gray methods

2) 几何校正。采用矩形框几何校正法和双线性插值法，图 6 为几何校正前后图。其中，图 6a 几何校正前的图像，图 6b 为几何校正后的图像。几何校正后，基本消除倾斜失真对叶面积测量的影响。



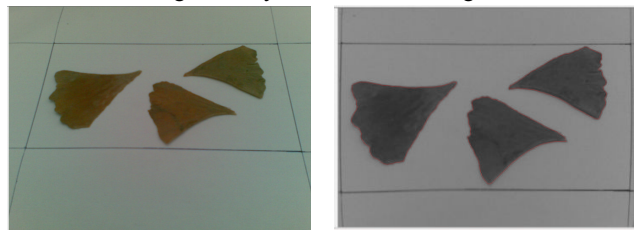
a. 灰度效果图



b. 灰度梯形图

图 5 灰度转换图

Fig.5 Grayscale Transition diagram



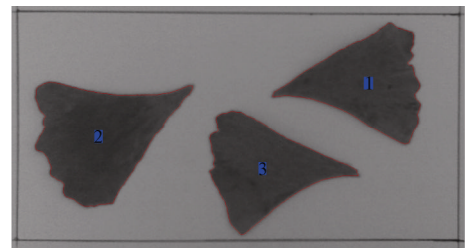
a. 几何校正前

b. 几何校正后

图 6 几何校正前后图

Fig.6 Before and after geometric correction diagram

3) 连通域扫描。LAS 软件可以获取每一个连通域的像素总数以及矩形框总像素。这些连通域中，连通域像素与矩形框总像素的比小于 0.005 被认为是杂质小颗粒；如果存在标签为 1 的区域，则被认为是图像边缘区域；剩下的区域则是目标区域（叶片）。图 6b 扫描效果如图 7。根据图 7 可知，连通域扫描能准确扫描并标记出了多个连通域，实现了多目标识别与测量，即多叶面积测量。



注：图中数字 1、2、3 是 LAS 软件对叶片自动进行的编号。

图 7 连通域扫描结果图

Fig.7 Connected regions scanning results diagram

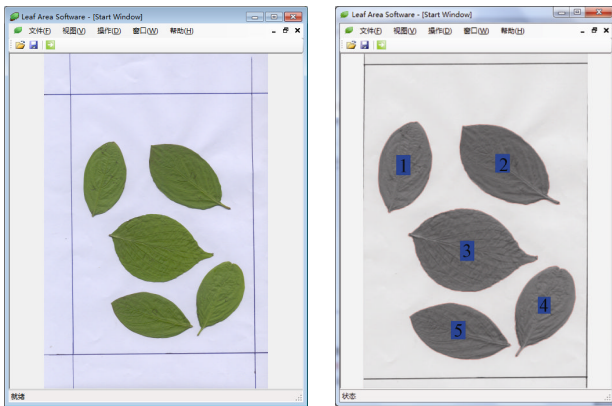
4) 叶面积统计与计算。采用公式 (6) 计算各叶片的面积, 并应用 .NET Framework4 自带的 SQL Server 2008 数据库, 实现了数据查询、数据储存、数据删除和数据导出等功能。

2.3 操作步骤

1) 取一张 A4 纸平铺在平坦的桌面上, 在 A4 纸上绘制 155 mm×218 mm 的矩形框 (其它尺寸, 需要在软件“选项”中设置矩形边框大小), 再将叶片放在矩形框内, 最后用透明玻璃将树叶压平, 如图 8a。

2) 用相机拍照, 注意要保证矩形框在成像范围内。

3) 将图像数据导入到电脑中, 在默认条件下, 运行 LAS 软件即可得到如图 8b、c 所示。其中, 图 8b 为 LAS 软件对原图像进行 GCCA 法处理后的图像, 图 8c 为图 8b 各叶片的统计计算结果。对比图 8a 和图 8b 发现, 原图像的矩形框得到了校正, 并且被放大、平移, 实现了对原图像有控制几何校正; 同时由图 8b 各叶片边缘的红框可知, 各叶片都被较准确的识别出来, 实现了多叶面积同时测量。



a. 原图像

b. GCCA 处理后图像

| 相片名 | 树叶编号 | 目标像素数 | 叶面积 (平方毫米) | 处理日期 |
|-----|------|--------|------------|--------------------|
| 1 | 4 | 155780 | 1717.92 | 2011/5/14 16:56:13 |
| 1 | 1 | 157819 | 1740.40 | 2011/5/14 16:56:13 |
| 1 | 5 | 171153 | 1887.45 | 2011/5/14 16:56:13 |
| 1 | 2 | 232405 | 2562.93 | 2011/5/14 16:56:13 |
| 1 | 3 | 303971 | 3352.14 | 2011/5/14 16:56:13 |

c. 结果输出窗口

图 8 默认条件下运行界面图

Fig.8 Interface diagram under default conditions

3 结果与分析

选取水稻叶、银杏叶、黄瓜叶 (这 3 种叶片的选取

具有普遍性, 能代表常见叶片形状, 如狭长形、扇形以及不规则形状等) 各 5 片为研究对象, 接着把 5 片水稻叶分别命名为 a1、a2、a3、a4、a5, 银杏叶命名为 b1、b2、b3、b4、b5, 黄瓜叶命名为 c1、c2、c3、c4、c5。再将 a1、b1、c1 列为一组, 记为 gp1; 同理将 a2、b2、c2, a3、b3、c3, a4、b4、c4, a5、b5、c5 依次记为 gp2、gp3、gp4、gp5。为了验证 GCCA 法的测量精确度及其使用范围, 对 gp1、gp2、gp3 和 gp4 进行垂直拍照, 选择坐标纸法为标准方法, 分别用长宽系数法^[28]、Photoshop 法及 GCCA 法测量各叶片面积, 测量结果见表 2, 其中坐标纸法和长宽系数法是直接测量, GCCA 法和 Photoshop 法是通过 Photoshop 和 LAS 软件扫描图像间接得到。为了进一步凸显出 GCCA 法几何校正的优越性, 还对 gp5 分别从垂直、正对着矩形框俯视 60°、侧对着矩形框俯视 60°和沿着矩形框对角线俯视 60°共 4 个方向拍照, 并用坐标纸法、Photoshop 法和 GCCA 法测量各叶片的面积, 测量结果见表 3。

表 2 测量结果表明: 1) 在垂直拍照情况下, GCCA 法测量精度最高, Photoshop 法次之, 长宽系数法最差; 2) Photoshop 法测量结果普遍偏小, 这是因为矩形框和叶片的容差选择不当而造成的。Photoshop 法人为因素影响较大, 容差的选择直接关系到测量结果的精度; 3) 长宽系数法测量误差整体较大。根据水稻叶、银杏叶、黄瓜叶测量结果的平均相对误差依次增大, 进一步得到长宽系数法的测量精度随着叶面形状复杂性的增大而减小。4) GCCA 法测量精度并不随叶片形状和叶片大小变化而变化。通过 SPSS 软件对水稻叶的相对误差和银杏叶的相对误差做两独立样本 *t* 检测, *P* 值为 0.862 远大于显著性水平 0.05, 即 GCCA 法对水稻叶和银杏叶的测量结果在精度上没有显著性的差异。同理, 对水稻叶的相对误差和黄瓜叶的相对误差再做两独立样本 *t* 检测, *P*=0.418 同样远大于显著性水平 0.05。因此, 在垂直拍照情况下, GCCA 法相对 Photoshop 法、长宽系数法在精确度上有显著优势, 其测量精度不受叶片形状和叶片大小的影响。

表 3 测量结果表明: 1) 在倾斜拍照的情况下, Photoshop 法测量相对误差虽然也随着叶面积增大而有减小的趋势, 但相对于垂直拍照, 其测量误差显著增大; 2) 表 3 中水稻叶倾斜测量相对误差远大于其他两种叶型测量相对误差还表明, Photoshop 法不适合测量长条形的叶片; (3) GCCA 法的测量精度受图像倾斜失真的影响较小。对表 3 进一步分析, 求出同一叶片 4 种不同方向拍照叶面积的平均值、标准差和变异系数, 计算结果如表 4 所示。由统计原理可知, 变异系数可以比较不同均值的样本间的变异度, 能正确地反映资料的精确性^[10]。由分析结果可知, GCCA 法变异系数远低于 Photoshop 法, 说明 GCCA 法测量结果重复性好, 测量结果更加稳定。而 Photoshop 法测量结果变异度大, 测量结果相对不稳定。

表 2 垂直拍照情况下不同方法测量结果对比
Table 2 Measurement results comparison of different methods under the condition of vertical taking pictures

| 叶片 | | 坐标纸法 | Photoshop 法 | | 长宽系数法 | | GCCA 法 | |
|------|----|---------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| | | 叶面积/mm ² | 叶面积/mm ² | 相对误差/% | 叶面积/mm ² | 相对误差/% | 叶面积/mm ² | 相对误差/% |
| 水稻叶 | a1 | 290 | 287.05 | -1.02 | 294 | 1.38 | 292.51 | 0.52 |
| | a2 | 301 | 298.03 | -0.99 | 308 | 2.33 | 302.47 | 0.49 |
| | a3 | 340 | 335.52 | -1.32 | 332 | -2.35 | 342.81 | 0.83 |
| | a4 | 269 | 266.53 | -0.92 | 273 | -1.49 | 271.58 | 0.96 |
| 银杏树叶 | b1 | 1670 | 1653.36 | -1.00 | 1703 | 1.98 | 1683.71 | 0.82 |
| | b2 | 2501 | 2477.06 | -0.96 | 2460 | -1.64 | 2521.1 | 0.80 |
| | b3 | 3226 | 3219.48 | -0.20 | 3285 | 1.83 | 3242.06 | 0.50 |
| | b4 | 1645 | 1629.75 | -0.93 | 1740 | 5.78 | 1657.8 | 0.78 |
| 黄瓜叶 | c1 | 2443 | 2438.93 | -0.17 | 2601 | 6.47 | 2453.71 | 0.44 |
| | c2 | 2264 | 2260.59 | -0.15 | 2198 | -2.92 | 2275.24 | 0.50 |
| | c3 | 3538 | 3503.49 | -0.98 | 3233 | -8.62 | 3546.02 | 0.23 |
| | c4 | 2433 | 2431.41 | -0.07 | 2696 | 10.81 | 2456.47 | 0.96 |

注：a 表示水稻叶，b 表示银杏树叶，c 表示黄瓜叶，ai、bi、ci 分别表示第 i 张图像中的水稻叶、银杏树叶、黄瓜叶的叶面积。

表 3 不同方向拍照情况下不同方法叶面积测量结果对比
Table 3 Comparison measurement results of different methods under the condition of taking pictures in different directions

| 叶片 | | 坐标纸法 | Photoshop 法 | | GCCA 法 | |
|------|-----|---------------------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| | | 叶面积/mm ² | 叶面积/mm ² | 相对误差/% | 叶面积/mm ² | 相对误差/% |
| 水稻叶 | 垂直 | | 289.41 | -0.55 | 291.78 | 0.27 |
| | 正向 | 291 | 279.49 | -3.96 | 292.33 | 0.46 |
| | 侧向 | | 273.99 | -5.85 | 291.29 | 0.10 |
| | 对角线 | | 280.53 | -3.60 | 294.61 | 1.24 |
| 银杏树叶 | 垂直 | | 1794.56 | -0.85 | 1820.28 | 0.57 |
| 银杏树叶 | 正向 | 1810 | 1784.38 | -1.42 | 1817.79 | 0.86 |
| | 侧向 | | 1779.22 | -1.70 | 1824.11 | 0.78 |
| | 对角线 | | 1766.64 | -2.40 | 1819.47 | 0.52 |
| | 黄瓜叶 | | 垂直 | 2401.56 | -1.29 | 2443.34 |
| 黄瓜叶 | 正向 | 2433 | 2613.01 | -2.54 | 2462.81 | 1.23 |
| | 侧向 | | 2368.70 | -2.64 | 2448.48 | 0.64 |
| | 对角线 | | 2410.45 | -0.93 | 2449.02 | 0.66 |

表 4 图像倾斜失真条件下叶面积测量稳定性分析及对比
Table 4 Stability analysis and comparison of area measurement under the condition of oblique distortion of digital image

| 叶片 | 方法 | 叶面积平均值/mm ² | 标准差/mm ² | 变异系数 |
|------|-------------|------------------------|---------------------|-------|
| 水稻叶 | Photoshop 法 | 280.855 | 6.384 | 0.023 |
| | GCCA 法 | 292.503 | 1.468 | 0.005 |
| 银杏树叶 | Photoshop 法 | 1781.200 | 11.612 | 0.007 |
| | GCCA 法 | 1820.413 | 2.674 | 0.001 |
| 黄瓜叶 | Photoshop 法 | 2448.430 | 111.180 | 0.045 |
| | GCCA 法 | 2450.913 | 2.674 | 0.001 |

为了显示出 GCCA 法在速度方面的优势，本试验还分别用 4 种方法对 gp1、gp2、gp3 和 gp4 进行叶片测量计时。结果表明：平均测量 1 片叶片，坐标纸法用时 415 s，长宽系数法用时 13 s，Photoshop 法用时 8 s，GCCA 法用时 1.1 s。可见，GCCA 法用时最少，在速度上具有显著优势，并且单张图像中叶片越多，其测量速度越快。如果一次同时测量 20 片叶片，其平均每片测量用时只需 0.2 s。

4 结 论

本文基于矩形框几何校正和连通域扫描技术，提出

了一种基于矩形框几何校正多叶面积测量方法（GCCA 法）。针对 GCCA 法，编制了 LAS 软件，并与坐标纸法、长宽系数法、Photoshop 法进行了比较，得出如下结论：

1) GCCA 法是一种测量精度较高、稳定性较好、适用范围较广的测量方法。相对于长宽系数法、Photoshop 法，其测量精度受到叶片形状、大小的变化和图像倾斜失真的影响较小。

2) GCCA 法继承了数字摄影图像处理法的优势，是一种快速的植物叶面积测定方法。其测量速度随着单张图片叶片数量的增大而提高。当一次测量 20 片叶片时，

叶片测量速度能达到 5 片/s。

3) 依据 GCCA 法编制成的 LAS 软件, 可消除人为因素的影响, 大大提高叶面积测量的互动性和通用性。如果用白纸带盖住叶片的叶柄, 该软件还可以应用于无损测量, 所以 GCCA 法既可以应用于室内, 也可以推广到室外, 为叶面积的测量提供了切实可行的新方法。

LAS 仍然有许多不足之处。如在叶面积测量过程中常常需要绘制矩形框, 图像导入等操作, 特别是在无损测量时总需要用白纸带盖住叶柄, 极不方便。而且当叶片较厚时, 由于存边缘阴影的存在, 测量结果往往稍稍偏大。因此, 如何引入边缘阴影抑制技术解决结果稍稍偏大和如何将 LAS 进一步完善, 开发出一套数据采集、数据传输和叶面积测量于一体的 LAS 叶面积测量系统, 有待进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] Igathinathane C, Prakash V, Padma U, et al. Interactive computer software development for leaf area measurement[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 51(1/2): 1—16.
- [2] 曹仪植, 宋占午. 植物生理学[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998.
- [3] CHO Y Y, OH S, OH M M, et al. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 111(4): 330—334.
- [4] Cristofori V, Roupheal Y, Gyves E M, et al. A simple model for estimating leaf area of hazelnut from linear measurements[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(2): 221—225.
- [5] Lizaso J I, Batchelor W D, Westgate M E. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves[J]. *Field Crops Research*, 2003, 80(1): 1—17.
- [6] Oneal 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] 自由路, 杨俐苹. 基于图像处理的植物叶面积测定方法[J]. *农业网络信息*, 2004, 14(1): 36—38.
Bai Youlu, Yang Liping. An Approach to measure plant leaf area using image process[J]. *Agriculture Network Information*, 2004, 14(1): 36—38. (in Chinese with English abstract)
- [8] 左欣, 韩斌, 程嘉林. 基于数字图像处理的植物叶面积测量方法[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 27(8): 194—196.
Zuo Xin, Han Bin, Cheng Jialin. A measurement approach of leaf area based on digital image processing[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 27(8): 194—196. (in Chinese with English abstract)
- [9] 马彦平, 自由路, 高祥照, 等. 基于数字图像的玉米叶面积测量方法研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 329—334.
Ma Yanping, Bai Youlu, Gao Xiangzhao, et al. Investigation of the method for measurement of corn leaf area based on image[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(22): 329—334. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张鑫. 基于图像处理的植物叶面积测定方法的研究[D]. 东北农业大学, 2009.
Zhang Xin. Studies on the Measurement of Plant Leaf Area Based on Image Processing[D]. Northeastern University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王泽发, 唐兴国. 基于灰度变换的图像增强方法研究[J]. *科技创新导报*, 2011, 6(1): 119.
- [12] 刘兴建. 关于数字图像处理中直方图均衡化的探讨[J]. *硅谷*, 2011, 4(16): 181—182.
- [13] 高浩军, 杜宇人. 中值滤波在图像处理中的应用[J]. *电子工程师*, 2004, 30(8): 35—36.
Gao Haojun, Du Yuren. The application of median filtering on image processing[J]. *Electronic Engineer*, 2004, 30(8): 35—36. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈兵旗, 孙明. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 403.
- [15] 李久芳. 基于二值化的边缘图像滤波方法[J]. *电子工业专用设备*, 2010, 39(2): 25—27.
Li Jiufang. A method of filtering edge map based on binary image processing[J]. *Equipment For Electronic Products Manufacturing*, 2010, 39(2): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王芳, 谢克明, 刘建霞. 应用最大熵和思维进化算法的阈值分割[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(34): 174—176.
Wang Fang, Xie Keming, Liu Jianxia. Threshold segmentation based on maximum entropy and me[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(34): 174—176. (in Chinese with English abstract)
- [17] Sahoo P, Wilkins C, Yeager J. Threshold selection using Renyi's entropy[J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(1): 71—84.
- [18] 李丹. 图像分割方法及其应用研究[J]. *科技信息*, 2010, 5(36): 498.
- [19] 马丽华, 梁志毅, 郑宏志. 一种显示器投影成像系统的彩色图象几何畸变校正方法[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 624—627.
Ma Lihua, Liang Zhiyi, Zheng Hongzhi. A geometric rectification method for imaging system by display projecting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 624—627. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕萌. 基于 Hough 变换的平行直线检测改进算法研究[J]. *微型机与应用*, 2010, 29(17): 27—29.
Lü Meng. Research of the improved parallel line detection algorithm based on Hough transform[J]. *Microcomputer and Its Applications*, 2010, 29(17): 27—29. (in Chinese with English abstract)
- [21] Kälviäinen H, Hirvonen P, Oja E. Hough tool—A software package for the use of the Hough transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1996, 17(8): 889—897.
- [22] Atiquzzaman M, W Akhtar M. Complete line segment description using the Hough transform[J]. *Image and Vision Computing*, 1994, 12(5): 267—273.
- [23] 崔艳华. 基于上下文的图像插值方法[D]. 西安电子科技大学, 2011.

- Cui Yanhua. Context-Based Image Interpolation Method[D]. Xidian University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] Evans O D, Kim Y. Efficient implementation of image warping on a multimedia processor[J]. *Real-Time Imaging*, 1998, 4(6): 417—428.
- [25] 张大坤, 罗三明. 形态学中闭运算功能的扩展及其应用[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(27): 185—187.
Zhang Dakun, Luo Sanming. Function extension of morphological closing operation and its application[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(27): 185—187. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨智勇, 周定康, 周琪云. 形态学运算在字符识别中的应用[J]. *计算机应用研究*, 2004, 21(6): 99—100, 103.
Yang Zhiyong, Zhou Dingkan, Zhou Qiyun. Application of mathematical morphologic process in character recognition[J]. *Application Research of Computers*, 2004, 21(6): 99—100, 103. (in Chinese with English abstract)
- [27] 马吉甫, 高雪峰. 基于扫描线的连通域搜索算法[J]. *福建电脑*, 2006, 16(12): 121—131.
- [28] Williams L, Martinson T E. Nondestructive leaf area estimation of ‘Niagara’ and ‘DeChaunac’ grapevines[J]. *Scientia Horticulturae*, 2003, 98(4): 493—498.

Multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box

Chen Taotao¹, Chi Daocai^{1*}, Liang Qian²

(1. *Water Conservancy Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China*; 2. *Rice Research Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China*)

Abstract: In order to solve limitations of both leaf-by-leaf measurement and oblique distortion of digital image, this paper presents a multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box (GCCA for short). The method extracts rectangle box using Hough transform, carries out geometric rectification, and enables Multi-leaf simultaneous measurement using connecting regions scan. At the same time this method is carried out by Visual Basic 2010 programming, and be compared with grid method, length-width method and Photoshop method respectively. Experimental results indicate that the GCCA method is a high stability method with great relevance to grid method and a broad applicable scope. Inheriting the advantages of digital photography image processing method, the GCCA method is also a rapid method for measurement of plant leaf area and its measurement speed increases as the number of leaves increases in a single image. Compilation of the software can eliminate the influence of human factors, and greatly improve the interactivity and versatility of leaf area measurement. GCCA method can be both applied to indoor and non-destructive measurement outdoor, providing a practical new approach for leaf area measurement.

Key words: measurements, image processing, geometry, leaf area, programming, connecting regions scan