

使用 Kinect 传感器的油菜叶片面积测量方法

徐胜勇, 黄伟军*, 周俊, 许卓群, 吴太晖, 樊一尘

(华中农业大学工学院, 湖北 武汉, 430070)

摘要:为快速准确地测定活体油菜的叶片面积,减小在数字图像处理中由于叶片的卷曲和变形带来的二维投影误差大的问题,使用 Kinect 传感器拍摄油菜叶片的彩色和深度图像,用三维方法测量叶片面积。利用绿色分量值显著的特性在彩色图中分割出叶片并将其映射到深度图。在深度图中,使用标定方块计算像素-物理尺寸转换参数,以计算叶片的三维点云。在三维点云中,检测叶片的轮廓并去除毛刺,再使用插值使点云网格化,最后使用海伦公式计算叶片轮廓包含的网格面积,得到叶片的总面积。实验结果表明,Kinect 传感器的测量方法成本低、精度高、通用性强。测量值与真实值之间显著正相关,相关系数为 0.998 5。使用回归方程 $y = 0.955x + 22.357$ 可以校正测量值,使其更准确地反映叶片面积。

关键词:油菜;叶片面积测量;Kinect 传感器;深度图像;三维图像(3D)

中图分类号:TP391.41,S565.4 文献标识码:A 文章编号:1007-9084(2017)01-0055-05

Measurement method of rapeseed leaf area using Kinect sensor

XU Sheng-yong, HUANG Wei-jun*, ZHOU Jun, XU Zhuo-qun, WU Tai-hui, FAN Yi-chen

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To reduce the error of two-dimensional projection on live, curly and deformed leaves measurement, Kinect sensor was used to capture three-dimensional data with color and depth images of rape leaves. By using color image, the leaf was separated from the background according to its conspicuous gray-value in green channel. The color image without background was mapped to depth image. By using calibration square in depth image, the pixel-physical scaling parameter was calculated for 3D point cloud of the leaf. Contour of the leaf was detected and smoothed first by point cloud, and then the cloud was mapped meshing with interpolation. Finally, the total area of the leaf including grids areas were counted by Helen formula. Results showed that Kinect sensor method had the advantages of low cost, high precision and universal application. The coefficient of the positive correlation between measured value and real value was 0.998 5. Regression equation $y = 0.955x + 22.357$ could be used to correct the measured value to reflect the actual value.

Key words: rapeseed; leaf area measurement; Kinect sensor; depth image; three demension image (3D image)

油菜是世界范围内广泛种植的油料作物之一。中国是油菜的主产国,产量占世界总产量的 $1/3$ ^[1]。叶片是作物光合作用的主要器官,叶面积大小对植物的生长发育、作物产量以及栽培管理等都具有十分重要的意义,是作物种群结构的一种标志性参数^[2]。叶片的大小对水分蒸发量、土壤水分平衡、

物质循环、生长发育、抗逆性、产量以及经济效益有着显著的影响,也是衡量植物生产状况和对光能利用的重要指标^[3]。因此,研究简便、精准的叶片面积测量方法对于油菜科研和生产都有重要意义。

目前测定叶片面积的传统方法主要有抛物线拟合、复印称重法、叶面积仪法等。抛物线法对叶片

收稿日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金(61503146);中央高校基本科研业务费专项资金(2014QC004);国家大学生创新创业训练项目(201510504059)

作者简介:徐胜勇(1980-),男,湖北蕲春人,讲师,博士,主要研究方向为计算机视觉和农业机器人, E-mail: xsy@mail.hzau.edu.cn

* 通讯作者:黄伟军(1982-),男,湖北赤壁人,讲师,博士,主要研究方向为机械装备的可靠性设计及质量检测, E-mail: wjhuang529@mail.hzau.edu.cn

的规则程度有一定的要求;复印称重法操作繁琐复杂、工作量较大,而且纸片的质量和复印机的质量影响测量精度;叶面积仪测量法会受到叶片大小的制约。随着科学技术的发展,基于图像处理的植物叶片测量方法设备简单、操作方便、测量准确,而且可以实现活体无损测量,在保持植株完整株型的前提下为下一次数据测量提供了保障^[4]。无损的图像处理技术逐渐成为国内外学者研究植物生长形态的重要手段^[5]。Femat – Diaz 等采用扫描仪获得叶片的彩色图像,统计叶片的像素数量以计算叶面积^[6]。类似的方法也应用于马铃薯^[7]、大豆^[4]等作物。马彦平等采用数码相机获取玉米叶片的彩色图像,提取图像的蓝色分量并进行预处理得到叶片本体,统计像素数量并转换为物理尺寸获得叶片的实际面积,该方法与用直尺法测量结果的相关性达到 0.996^[2]。石剑飞等试验和比较了纸板称重、打孔称重和数字图像处理等三种油菜叶片面积测定方法,结果表明图像处理法具有最高的精度,测定结果乘以校正系数 1.05 得到的数据与叶面积仪测定结果高度一致^[8]。徐义鑫等使用手机摄像头拍摄植物叶片的彩色图像,考虑了镜头畸变并校正图像,继而提取叶片的轮廓并测量其长、宽、周长、面积等几何参数,测量精度较高^[9]。何雪军等提取茶鲜叶图像的轮廓点并均匀化、稀疏化,引入约束 Delaunay 三角网对叶片区域进行三角剖分,再计算叶片面积等参数^[10]。

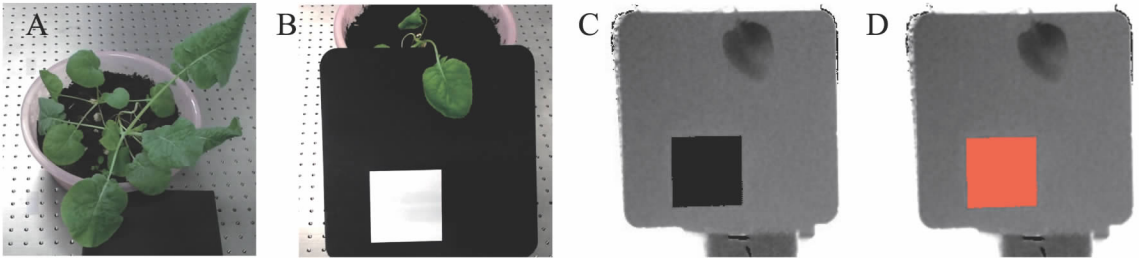
以上进展说明,图像处理法测量叶片参数已被广泛研究。但多数方法都依据叶片在 CCD 平面的二维投影产生的像素点去计算叶片参数。实际上,生长形态和变形等因素都使得叶片不可能是一个绝对的平面,直接使用二维图像进行测量将导致测量误差。只有依据叶片在三维空间中的形态构型才能实现更精确的测量。

Kinect 传感器(微软公司生产)是一种人机交互装置,能够同时获取目标的彩色、红外和深度信息。相比传统的激光扫描、核磁共振成像等三维信息获取方法,价格非常低廉、体积小巧。这种特性和优势引起了相关科研机构的重视,使用其附带的 SDK 可以快速地开发各类高级的应用程序。Kinect 在现代农业信息领域也获得了推广和应用。如 Yamamoto 等使用 Kinect 传感器获取草莓植株的生长信息如高度、宽度、体积、叶片面积、倾角和颜色等,相关系数超过 0.8^[11]。Chen 等使用 Kincet 传感器获取水稻的叶片面积指数和倾角分布^[12]。关于 Kinect 传感器获取的深度数据处理也有相关研究^[13]。Kinect 设备的引入和应用为研究新的农业信息方法开辟了新思路。本文以油菜叶片为对象,研究了使用 Kinect 传感器测量叶片面积的方法。使用 Kinect 传感器同时采集油菜叶片的彩色和深度图像,在彩色图像中确定油菜叶片本体区域,再在深度图像中拟合叶片曲面并计算叶片的面积。该测量方法快速而精确,对叶片面积适应范围大,可以推广应用于其他植物叶片参数的活体无损测量。

1 材料与方法

1.1 材料和设备

为采集实验所需图像,2016 年 6 月至 8 月在室内培育了甘蓝型油菜品种大地 55 幼苗,如图 1A 所示。将培育的盆栽油菜放置于光学实验平台上,架设好 Kinect 2.0 传感器。在室内照明环境下,使用黑色背景板(背景板上张贴有方形白色纸片作为标定物)作为背景,拍摄样本叶片的视频。其中的一帧彩色图像如图 1B 所示,对应的深度图像如图 1C 所示。另拍摄了大小、形态各异的油菜叶片图像 12 张,用于本文的实验和测试。



注:A:盆栽油菜苗;B:Kinect 传感器拍摄的油菜叶片彩色图像;C:彩色图像对应的深度图;D:形成一个大的连通域的标定方块
Note: A: rapeseed seedling in pot; B: color image of rapeseed leaf by Kinect sensor; C: depth image corresponding to the color image; D: calibration square has been filled into a big connected domain

图 1 Kinect 传感器拍摄盆栽油菜叶片图像
Fig. 1 Images of rapeseed leaf collected by Kinect sensor

由于叶片面积和表面曲率都较小,叶片区域在深度图中的灰度值变化非常平缓,肉眼难以进行观察。可使用公式(1)对深度图像进行变换,以增强深度图像的显示效果。

$$D' = (H - H_0) \times 255/4\ 000 \quad (1)$$

其中: D' 为增强的深度图像的灰度值; H 为原始的深度值; H_0 为传感器到背景板的距离,本文测量值约为500mm。

1.2 图像预处理

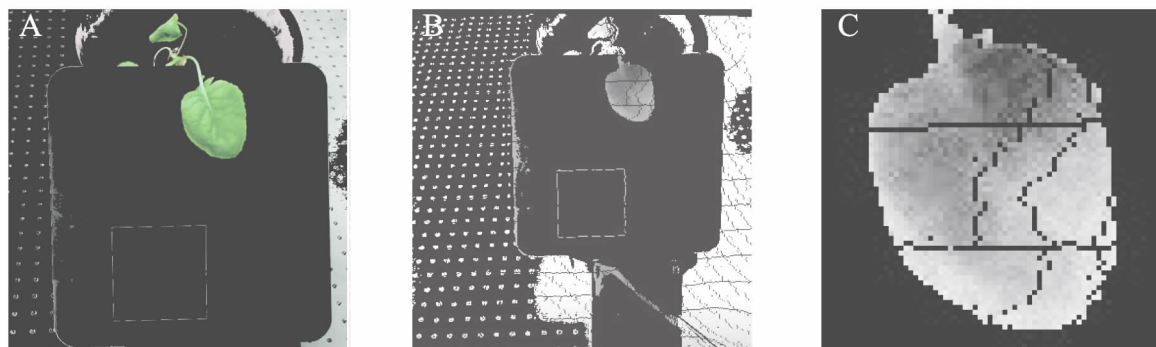
1.2.1 像素-物理尺寸转换参数的标定 数字图像处理中的度量单位是像素,必须转换为物理尺寸单位如毫米。我们利用白色物体吸收红外线的特性来标定转换参数。从白色 A4 纸上裁剪出边长为 L 的正方形白色方块,张贴在背景板上,如图 1B 所示。尺寸标定使用深度图像进行,如图 1C 所示,标定方块完全吸收了红外线,显示为纯黑色。在自行开发的人工交互式标定程序中,只需手动点击标定方块区域,漫水填充算法^[14]将自动运行,方块区域中的白色噪声点完全被消除了,同时形成了一个大连通域,如图 1D 中橙色区域。转换参数的计算如公式(2)。

$$C = \sqrt{L^2/N_0} \quad (2)$$

其中: C 为尺寸转换因子,单位为 mm/pixel; L 为方

块的边长,单位为 mm; N_0 为填充区域的像素个数。根据公式(1)可以将 X/Y 两个轴的像素尺寸转换为物理尺寸。由于 Kinect 的深度值已经是物理尺寸的值(出厂时已标定好),因此 Z 轴不需要进行标定。

1.2.2 叶片区域深度信息的获取 油菜的彩色 RGB 图像中,叶片区域的绿色(G)分量显著大于其他区域。设置一个 G 分量阈值 G_0 (本文中为 120),对 G 分量值 $G(x,y) < G_0$ 的像素点,其 RGB 三个通道的灰度值全部设置为 0。这样,叶片区域将被很好地分割出来,如图 2A 所示。通过调用 Kinect for windows SDK 提供的映射函数 MapDepthToColorImagePoint,实现彩色图像和深度图像的对齐,即将彩色图像中的每一个像素点(u,v)映射到深度图中的像素点(x,y,z)。对于彩色图像中 RGB 三通道值都为 0 的像素点,在深度图中对应的像素点的 Z 坐标值设置为 0(无穷远)。这样,深度图中叶片区域和背景板被分割,背景在视觉效果上表现为纯黑色,如图 2B 所示。手动定义 RIO(感兴趣区域),将叶片区域从大深度图中裁剪出来,进行后续的处理,如图 2C 所示。此外,Kinect 传感器在工作时有系统噪声和波动,导致每一张深度图的数据都不一样。连续静止拍摄 30 帧深度图像,叠加再取平均值,可以有效消除波动和大部分噪声。



注:A:使用 G 分量阈值分割的彩色图像;B:分离了背景的深度图;C:叶片的深度图

Note: A: color image segmented by G channel threshold; B: depth image without background; C: depth image of leaf

图2 叶片深度信息的获取流程与结果

Fig.2 Procedure and result of depth-info acquirement of leaf

1.3 叶片面积计算

1.3.1 叶片边缘毛刺的去除 叶片边缘的曲率较大,导致红外线不能正常反射到 Kinect 传感器,造成深度测量误差,在三维视图中表现为叶片的边缘有大量的毛刺(图 3A)。必须先去除毛刺再进行后续处理,以保障测量精度。油菜叶片是连续的曲面,曲面上像素点的灰度值是连续变化的,而毛刺点的灰度值是突变的。使用拉普拉斯算子对深度图进行滤波,得到叶片边缘(像素值异常突变点),再在原

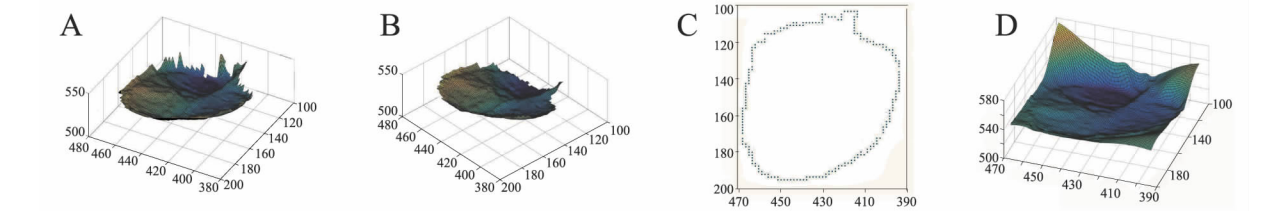
深度图中减去检测到的边缘,得到了去除毛刺的深度图(三维视图,图 3B)。

1.3.2 基于深度图像的叶片面积计算 去除了毛刺的深度图中包含有背景(灰度值为 0)和叶片(灰度值不为 0),输出所有灰度值大于 0 的像素点的三维坐标,得到叶片的三维点云。对三维点云进行插值使其均匀化,然后再进行曲面拟合,进而计算曲面的面积。详细流程如下:

(1)获取叶片的轮廓点集。从横坐标值 $x = 0$

的所有点中搜索和挑选出纵坐标 y 值最小和最大的两个点,保存到轮廓点集;再对 x = 1 的点进行处理,

直至遍历全部三维点云,得到完整的轮廓点集。提取的叶片轮廓的二维投影如图 3C 所示。



注:A:边缘有毛刺的叶片三维图;B:去除毛刺的叶片三维曲面图;C:叶片轮廓的二维投影图;D:包含叶片的矩形区域的三维网格曲面
Note:A:3D image of leaf with burrs; B:3D image of leaf without burrs; C:2D projection image of leaf contour;D:3D gridding surface of rectangular region including leaf

图3 深度图处理流程与结果
Fig.3 Procedure and results of depth map processing

(2)插值与三维曲面拟合。三维点云是稀疏的,为了提高叶片三维模型的精度细节,需要使用 Matlab 函数 griddata (x,y,z,XI,YI)进行插值,以填补点云中的空洞,同时点云变得均匀而密集。MATLAB 函数 surf (X,Y,Z)可以拟合一个矩形区域的三维点云,产生由 xyz 三维坐标值指定的有色参数化曲面,即三维有色图。曲面拟合图的俯视图为一个矩形,包含有叶片区域(图 3D)。

行了对比。本文中尺寸转换参数标定的结果为 1.050 2mm/pixel,使用该参数化将图像处理的测量结果转换为物理尺寸单位 mm²。定义了测量相对误差描述测量精度,如公式(3)。

$$ERR = \frac{S_T}{S_R} \times 100\%$$
 (3)

其中:S_T 为测量值,S_R 为真实值。

(3)数据镂空。数据镂空依据轮廓点集进行,遍历插值后的曲面,若点在轮廓外则设置为 NAN (not a number),若在轮廓内则保留,如此得到叶片的拟合曲面(图 3B)。

模拟实验使用 A4 纸打印和裁剪出已知尺寸的长方形、等边三角形、圆形的绿色纸片,粘贴在背景板上进行测量。为了测试本文方法对于曲面的、倾斜的物体的测量适应性,使用 Kinect 传感器拍摄了两类照片:第一类,背景板平行于 CCD,实验结果中标注为“姿态 1”;第二类,将纸片卷曲并将背景板相对于镜头摆放为一个小的倾角,标注为“姿态 2”。规则图形的实际面积根据面积计算公式计算得到。测量结果如表 1 所示。由表 1 可知:(1)姿态 1 时,文献[9]方法相比本文方法的测量误差略小,但两者误差均在 2% 以内。(2)姿态 2 时,文献[9]方法的平均误差比本文算法大 3 倍以上。由此可见,本文方法对于叶片的形态和姿态有很好的适应性。此外,本文方法测量的面积均大于真实值,这是由于深度图中毛刺的去除不够彻底,额外增加了叶片边缘区域的面积统计值,导致计算结果偏大。

(4)叶片三维曲面的面积计算。叶片曲面由大量的立体小网格构成。小网格有 3 个顶点时,计算顶点之间的相互距离再使用海伦公式计算三角形面积;有 4 个顶点时,先划分为两个三角形,分别计算面积再求和。依据这个原则,计算每一个网格的面积并求和,得到叶片拟合曲面的总面积。

2 结果与分析

2.1 用模拟方式测试方法的精度和适应性

为了测试本文方法的精度和适应性,分别使用模拟和实体两种实验方式,并与文献[9]的方法进

表 1 规则图形测量结果
Table 1 Test result of regular graphics/mm²

图形 Graphics	实际面积 Real area	文献[9] 姿态 1 Pose 1 in [9]	误差 ERR /%	本算法姿态 1 Pose 1 by Kinect	误差 ERR /%	文献[9] 姿态 2 Pose 2 in [9]	误差 ERR /%	本算法姿态 2 Pose 2 by Kinect	误差 ERR /%
长方形 Rectangle	10 000	9 866	1.44	1 096	0.96	9 124	8.76	1 185	1.85
三角形 Triangle	4 330	4 280	1.15	4 415	1.95	3 986	7.94	4 455	2.88
圆形 Circle	7 854	7 728	1.60	7 999	1.84	7 078	9.88	8 101	3.15
平均值 Average			1.40		1.58		8.86		2.63

注:姿态 1 指背景板平行于 CCD;姿态 2 指背景板相对于 CCD 有倾角。参考文献[9]
Note:Pose 1;background board parallal with CCD. Pose 2;background skewing with CCD. See to ref. [9]

2.2 用实体方式测试方法的精度和适应性

实体实验使用自然生长的活体油菜叶片。自然生长的油菜叶片是卷曲的,在使用 Kinect 传感器采集完图像之后,将叶片剪下,沿着叶面的弯折纹理将叶片剪开,使用透明玻璃板压平,如图 4A 所示。此时叶片几乎不存在卷曲和倾斜,基于二维平面投影的测量方法误差极小。因此,拍摄平行于 CCD 的铺平叶片的彩色图像,检测和统计叶片的像素点数量

并转换为物理尺寸,作为真实值。分别使用文献[9]方法和本文方法测量了 12 组叶片,结果如图 4B 所示。因为叶片的弯曲,导致文献[9]方法的误差较大,平均相对误差达到了 5.9%,12 组测量结果中仅有 2 组精度超过本文方法。本文方法平均误差为 4.4%,某些组数的误差值低至 1.15%。实验结果表明,对于面积较大的叶片,本文方法相比文献[9]方法具有较大的精度优势。

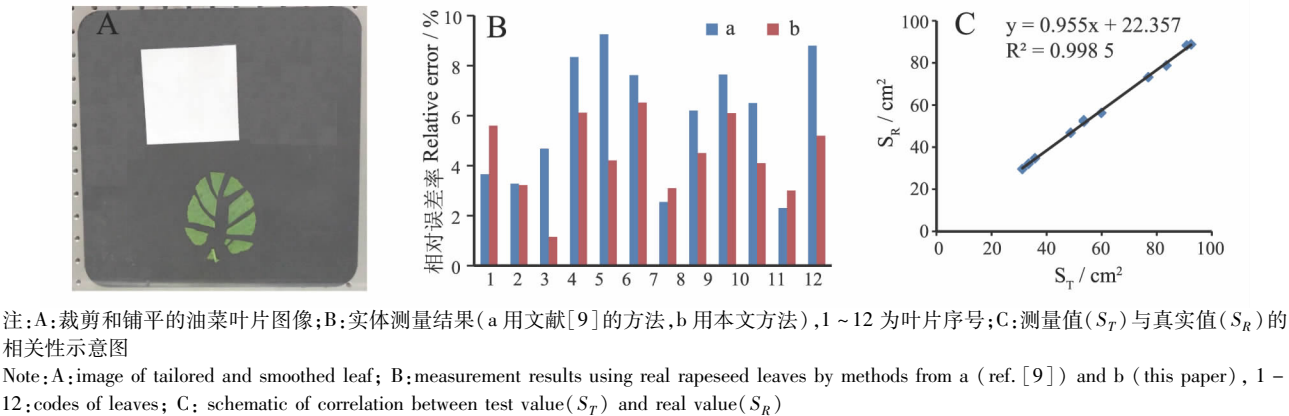


图 4 实体叶片测试和线性拟合
Fig.4 Test results using real leaves and fit linear

2.3 回归分析

对本文的实验结果进行了回归分析,建立线性回归方程为 $y = ax + b$,将 12 组真实值和测量值代入该方程,使用最小二乘法进行拟合,结果如图 4C 所示。纵坐标是叶片面积真实值,横坐标是测量值,黑色直线是拟合的直线。测量值与真实值之间呈现显著正相关,相关系数为 0.998 5,回归方程为 $y = 0.955x + 22.357$ 。使用该公式,可以校正测量值使其更准确地反映植株上叶片面积的大小。

3 讨论与结论

本研究使用 Kinect 传感器拍摄油菜的彩色和深度图像,使用图像处理法快速、准确地测定活体油菜的叶片面积,只需要微型计算机等常用的工具,即可完成无损测量,操作简单、工作量小。相对于文献[9]等采用二维平面投影的测量方法,本文的三维测量方法精度更高,尤其是对于卷曲的、变形的油菜叶片具有很好的适应性,而且对叶片的大小没有严格要求,测量的总体平均相对误差为 4.4%,并可用线性回归方程很好地校正测量误差。本文方法测量值比真实值大,这是叶片边缘不能完全反射红外线到深度传感器,导致了深度图中叶片边缘存在毛刺,从而导致了测量误差。本文对深度图进行了滤波以去除毛刺,但效果仍有改进的空间,需要研究更好的

毛刺去除方法,进一步提高测量精度。此外,当前方法中需要人工摆设背景板,需要进一步提升自动化程度。总之,基于 Kinect 传感器的叶片面积测量方法具有便携、低成本、快速高效、测量精度高等特点。若能进一步完善解决叶片边缘的毛刺去除问题,将有效提升测量精度。此外,目前的测量对象是单株盆栽油菜,其形态是充分伸展的,基本不存在相互遮挡的情况。对于大田密集种植的油菜,植株之间存在遮挡,需要进一步研究整株油菜的图像分割和性状测量技术,以实现大田在线的自动化、高通量测量,为作物遗传育种、高产栽培等研究提供关键基础数据。

参考文献:

[1] 王道杰,桂月靖,杨翠玲,等. 油菜苗期抗旱性及鉴定指标筛选[J]. 西北农业学报,2012,21(5):108-113.
[2] 马彦平,白由路,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.
[3] 王忠芝,张金瑞. 基于图像处理的叶片面积测量方法[J]. 微计算机应用,2010,31(5):68-72.
[4] 谭 峰,高艳萍. 基于图像的植物叶面积无损测量方法研究[J]. 农业工程学报,2008,24(5):170-173.