

基于智能手机方位传感器的叶面积测量校正

高大帅¹ 林剑辉^{1*} 余江斌¹ 孙宇瑞² SCHULZE Lammers Peter³

(1. 北京林业大学 工学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

3. 德国波恩大学 农业工程研究所, 波恩 53115)

摘要 针对使用智能手机野外测量叶面积时很难保证主光轴与叶平面垂直导致测量精度下降的问题, 采用针孔相机模型和数字图像处理技术相结合的方法, 对叶片平面和手机平面存在夹角时的叶面积测量建立误差校正模型并进行研究。1) 以 10 片不同大小的椭圆形模拟叶片对开发的 android App 进行仿真测试, 结果显示, 叶面积测量值与理论值之间的决策系数高于 97%, 并且随着叶片与手机平面夹角的增大而减小, 校正后的相对误差为 -6%~8%, 未校正的高达 41.4%。2) 以向日葵、番茄、辣椒和茄子等植物叶片对误差校正公式进行验证, 结果显示, 当夹角 $<15^\circ$, 拍照高度为 30~65 cm 时, 叶面积测量的相对误差为 -6%~6%, 未校正的为 -27.5%~25%。

关键词 叶面积; 针孔相机模型; android App; 误差校正

中图分类号 TP391

文章编号 1007-4333(2017)06-0128-07

文献标志码 A

Leaf area measurement correction based on smartphone orientation sensor

GAO Dashuai¹, LIN Jianhui^{1*}, YU Jiangbin¹, SUN Yurui², SCHULZE Lammers Peter³

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Institute of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract Aiming at the problem that it is difficult to keep phone camera's optical axis vertical with leaf plane when measuring leaf area under field condition. The pinhole camera model and digital image processing techniques were used to correct the leaf area measurement in this study to build an error correction model for the quantitative influence of camera tilt angle factor on leaf area measurement. The results showed that: 1) Ten virtual oval green leaves with different sizes were used to test the developed android APP. Simulation results showed that the decision coefficients between measured area and theoretical area were higher than 97% and decrease with the increase of the camera tilt angle, the relative error of the corrected leaf area was range from -6% to 8%, while the uncorrected error was up to 41%. 2) Leaves of sunflower, tomato, pepper, and eggplants were selected to verify the proposed method. Experiment results showed that when the camera tilt angle was less than 15 degrees and the distance between leaf and phone was about 30 to 65 cm, the measured relative error was ranged from -6% to 6%, while the uncorrected error was ranged from -27.5% to 25%.

Keywords leaf area; pinhole camera model; android App; error correction

叶片是植物光合作用的窗口, 水分蒸腾的媒介。在园艺作物栽培与管理中, 叶面积是研究作物生长

发育规律、群体光合效能和制定作物栽培措施与技术标准的重要参数^[1-2], 因此实现植物叶片面积的快

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZCQ-GX-03); 国家自然科学基金面上项目(31371537)

第一作者: 高大帅, 硕士研究生, E-mail: 15201445499@163.com

通讯作者: 林剑辉, 副教授, 主要从事林业生态信息采集与处理研究, E-mail: swiq_lin@163.com

速、准确测量对于指导农业生产和园艺作物栽培具有重要意义。

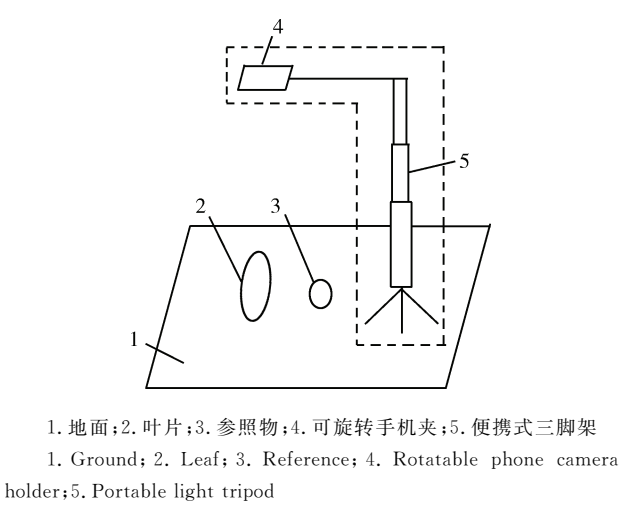
传统叶面积的测量方法主要有称重法、数方格法及数学公式法^[3-5]。称重法和数方格法能够取得较高的测量精度,但耗时耗力;数学公式法能够实现快速无损测量,但其测量精度较低。由于传统测量方法的不足,基于数字图像处理的叶面积测量方法得到广泛的研究,并取得了显著的成果^[6-13]。其叶面积测量基本原理为:使用数字图像处理技术对被测植物叶片和参照物进行分割并二值化,根据叶片和参照物像素面积比获得叶片面积。由于 android 智能手机的高 CPU 处理速度和高摄像头分辨率等优点,基于 android 智能手机的快速无损测量系统得到了广泛应用^[14-16]。基于正方形校正^[6,15-16](四点透视变换或四点双线性内插变换)的植物叶片面积测量方法精度较高,也能实现无损测量,但未讨论叶片和手机平面有夹角时的误差分析,而整株植物叶片面积测量时需要解决叶片分层及叶片倾角等问题。

本研究拟采用针孔相机模型及数字图像处理技术相结合的方法研究量化叶片与手机平面存在夹角时的叶面积测量误差,以期利用 android 智能手机方位传感器实现夹角误差校正,在保证测量精度的同时增加拍照自由度,提高此类方法计算叶面积时的适应性,为进一步整株植物叶片面积简便测量提供基础算法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

图像获取装置见图 1。便携式轻型三脚架 SL-2047 能够调整拍照高度,可旋转手机夹调整手机倾斜角度。三脚架仅在模型建立阶段时需要,开发的 android App 进行叶面积测量时不需要此装置。直径 3 cm 的彩打纯红色圆纸作为参照物使用,彩打纯绿色椭圆形叶片 10 张用来进行模拟叶片仿真试验。不同形状大小的向日葵、番茄、辣椒和茄子叶片若干,用来对提出的校正算法进行测试验证。选用 android 智能手机在自然光照下进行图像获取,其型号为 HONOR H30-L01,版本 4.42,处理器 4 核 1.6 GHz,摄像头分辨率 3 264 像素×2 488 像素,运行内存 2G,集成有方位传感器。App 应用程序在 win7 操作系统中使用 eclipse3.7 开发完成。



1. Ground; 2. Leaf; 3. Reference; 4. Rotatable phone camera holder; 5. Portable light tripod

图 1 图像获取装置结构示意图

Fig. 1 Image acquisition system structure

1.2 试验方法

1.2.1 图像获取

图像获取时需要选择参照物和背景,试验中以红色圆纸作为参照物,以白色或灰色平整地面作为背景。自定义像机拍照界面,调用 android 手机光照传感器和方位传感器以实时获取当前拍摄图像的光照强度和拍照倾角,获取的图像以系统当前时间命名保存在内存卡中。

1.2.2 图像分割

手机拍照获取的图片是 RGB 格式,为使分割算法对光照和阴影具有一定的鲁棒性,试验中采用机器视觉中常用的 HIS 颜色空间。考虑绿色叶片和红色参照物的颜色特征,选用饱和度 S 通道进行图像分割。利用饱和度 $S>0.3$ 和圆度 >0.85 作为特征首先提取参照物,即满足此条件的像素点设置为 1,否则为 0。对参照物以外区域以饱和度 $S>0.2$ 为准则提取绿色叶片。

1.2.3 图像滤波

图像分割阶段会不可避免的引进噪声,形态学开运算滤波对消除噪声十分有效。结构元素 B 对 A 的开运算,记为 $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$,即先采用结构元素 B 对 A 做腐蚀运算 $\ominus$,再使用 B 对 A 做膨胀运算 $\oplus$ 。试验中分别选用 5×5 和 3×3 圆形结构元素对分割后叶片图像和参照物图像进行开运算操作。

1.2.4 夹角误差校正

在获取图像时不能保证叶片和手机平面一定平行,因此会出现几何失真,试验中建立的夹角误差模型及校正方法详见本文 2.1 节。

1.2.5 叶片面积计算

叶片面积计算公式为：

$$A_{\text{leaf}} = \frac{N_{\text{leaf}}}{N_{\text{ref}}} \times A_{\text{ref}} / (1 + \epsilon_{\text{angle}})$$
 (1)

式中： A_{leaf} 为植物叶片面积； A_{ref} 为圆形参照物面积； N_{leaf} 为叶片像素数； N_{ref} 为参照物像素数； ϵ_{angle} 为叶片和手机平面夹角引起的相对误差。

2 夹角误差模型和试验验证

2.1 夹角误差模型

试验中使用的夹角误差模型建立在相对高度差模型基础上,故先分析叶片和参照物的相对高度差对测量结果的影响。

2.1.1 相对高度差引起的叶面积测量误差分析

由基本针孔模型^[17]可知,三维空间点 (X,Y,Z) 在相平面上的投影 (u,v) 满足：

$$\begin{cases} u = \frac{fX}{Z} \\ v = \frac{fY}{Z} \end{cases}$$
 (2)

式中： f 为相机焦距。由式(2)知,当平面物体平行于成像平面时,其像素面积与高度的平方成反比,即

$$N_{\text{obj}} = \frac{k}{h^2} A_{\text{obj}}$$
 (3)

式中 k 为与相机焦距 f 相关的定常数, h 为拍照高度, A_{obj} 为物体面积, N_{obj} 为物体像素面积。为测试手机摄像头成像是否满足式(3),对参照物每隔5 cm进行3次拍照,为加快计算速度,试验中图像压缩为816像素×612像素,结果见表1。可知,当拍照高度 $h < 25$ cm时, k 值较大,因距离近时红色圆边缘清晰,向外辐射致使其像素面积 N_{obj} 变大;当 $h > 65$ cm时, k 值较小,因距离远时红色圆边缘模糊,由分割算法知 N_{obj} 变小;当 h 为30~65 cm时, k 值波动很小,此时红色圆边缘提取误差小,与文献[14]给出的30~60 cm拍照高度一致。若不计分割算法对测量结果的影响,手机摄像头成像满足式(3)。

以式(3)为理论依据分析由相对高度差引起的测量误差。假定被测物体和参照物均为圆形,两者距成像平面的高度分别为 h 和 $(h + \Delta h)$,由 Δh 引起的相对误差为：

$$\epsilon_{\Delta h} = \left(\frac{N_{\text{obj}}}{N_{\text{ref}}} - \frac{A_{\text{obj}}}{A_{\text{ref}}} \right) / \left(\frac{A_{\text{obj}}}{A_{\text{ref}}} \right)$$
 (4)

表 1 参照物像素面积 N_{obj} 和相机参数 k 随拍照 h 高度的变化

Table 1 Relationship of pixel area of reference N_{obj} and camera parameter k with camera height h

拍照高度/cm Camera height	参照物面积/像素 Pixel area of reference				相机参数 Camera parameter
	试验 1	试验 2	试验 3	均值	
	Test 1	Test 2	Test 3	Mean	
15	15 257	15 178	15 670	15 368	489 179
20	8 228	8 328	8 304	8 287	468 948
25	5 090	5 102	5 092	5 095	450 496
30	3 334	3 339	3 340	3 338	425 007
35	2 452	2 443	2 445	2 447	424 070
40	1 866	1 842	1 884	1 864	421 923
45	1 449	1 458	1 431	1 446	414 248
50	1 161	1 156	1 163	1 160	410 266
55	946	941	946	944	403 984
60	796	793	785	791	402 853
65	676	682	679	679	405 849
70	555	557	540	551	381 958
75	489	486	486	487	387 542

将式(3)代入可得：

$$\epsilon_{\Delta h} = \frac{(h + \Delta h)^2}{h^2} - 1 \approx 2 \frac{\Delta h}{h} \tag{5}$$

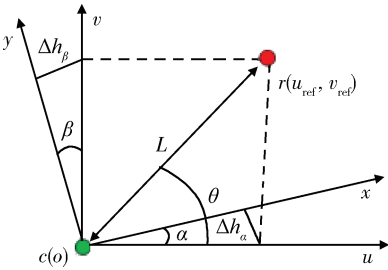
测量叶片时,参照物和叶片相对高度差 Δh 约为 1~4 mm,假定 $\Delta h=2$ mm, $h=40$ cm,则由此引起的叶面积测量相对误差 $\epsilon_{\Delta h}$ 为 1%。

2.1.2 夹角误差模型建立

将叶片和参照物的中心当作质点。夹角误差模型见图 2: c 为叶片质点 o 的像点, cuv 为手机成像平面坐标系, oxy 为叶片平面世界坐标系, u 轴与 x 轴的夹角为 α , v 轴与 y 轴夹角为 β ,叶片与参照物间距为 L ,叶片和参照物连线 cr 与 u 轴夹角为 θ 。

当叶片和手机平面存在夹角时, α 引起的相对高度差 $\Delta h_a=L\cos\theta\sin\alpha$,由式(5)可知引起的相对误差 $\epsilon_a'=2 \frac{\Delta h_a}{h}$,由试验数据得知真实相对误差 $\epsilon_a=2\epsilon_a'=4 \frac{\Delta h_a}{h}$,同理 $\Delta h_\beta=L\sin\theta\sin\beta$, $\epsilon_\beta=4 \frac{\Delta h_\beta}{h}$ 。由于 θ 可存在于四个象限, α 和 β 可正可负,因此共有 16

种情况。经过多次试验统计,由叶片和手机平面夹角引起的相对误差 ϵ_{angle} 见表 2。



c 为叶片质点 o 的像点, cuv 为手机成像平面坐标系, oxy 为叶片平面世界坐标系; α 为 u 轴与 x 轴的夹角, β 为 v 轴与 y 轴夹角; L 为叶片与参照物间距, θ 为叶片和参照物连线 cr 与 u 轴夹角。
Point o represents the center of the leaf, the corresponding image point is denoted as c . Coordinate system oxy represents the plane where the leaf is located, cuv represents the image plane. α is the angle between u -axis and x -axis, β is the angle between v -axis and y -axis. L is the distance between the centers of leaf and reference, θ is the angle between u -axis and line cr .

图 2 夹角误差模型

Fig. 2 Camera tilt angle model

表 2 叶片和手机平面夹角引起的相对误差
Table 2 Relative error caused by camera tilt angle

参照物和叶片质心连线 与 u 轴夹角 θ	u 轴与 x 轴 夹角 α	v 轴与 y 轴 夹角 β	α 引起的相对 误差 ϵ_a	β 引起的相对 误差 ϵ_β	总相对误差 ϵ_{angle}
0~90°	>0	>0	>0	>0	$\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
0~90°	>0	<0	>0	<0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
0~90°	<0	>0	<0	>0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
0~90°	<0	<0	<0	<0	$-\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
90°~180°	>0	>0	<0	>0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
90°~180°	>0	<0	<0	<0	$-\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
90°~180°	<0	>0	>0	>0	$\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
90°~180°	<0	<0	>0	<0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
180°~270°	>0	>0	<0	<0	$-\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
180°~270°	>0	<0	<0	>0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
180°~270°	<0	>0	>0	<0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
180°~270°	<0	<0	>0	>0	$\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
270°~360°	>0	>0	>0	<0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$
270°~360°	>0	<0	>0	>0	$\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
270°~360°	<0	>0	<0	<0	$-\sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_\beta^2}$
270°~360°	<0	<0	<0	>0	$\epsilon_a + \epsilon_\beta$

2.1.3 模型参数求解

夹角误差模型中共有 α 、 β 、 θ 、 h 、 L 5 个参数,其中 α 和 β 可由 android 智能手机方位传感器直接获得。在相平面中,记叶片坐标为 $(u_{\text{leaf}}, v_{\text{leaf}})$,参照物坐标为 $(u_{\text{ref}}, v_{\text{ref}})$,则 θ 可由反正切公式得出:

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{v_{\text{ref}} - v_{\text{leaf}}}{u_{\text{ref}} - u_{\text{leaf}}}\right) & u_{\text{ref}} \geq u_{\text{leaf}}, v_{\text{ref}} \geq v_{\text{leaf}} \\ 180^\circ + \arctan\left(\frac{v_{\text{ref}} - v_{\text{leaf}}}{u_{\text{ref}} - u_{\text{leaf}}}\right) & u_{\text{ref}} < u_{\text{leaf}}, v_{\text{ref}} \geq v_{\text{leaf}} \\ 180^\circ + \arctan\left(\frac{v_{\text{ref}} - v_{\text{leaf}}}{u_{\text{ref}} - u_{\text{leaf}}}\right) & u_{\text{ref}} \leq u_{\text{leaf}}, v_{\text{ref}} < v_{\text{leaf}} \\ 360^\circ + \arctan\left(\frac{v_{\text{ref}} - v_{\text{leaf}}}{u_{\text{ref}} - u_{\text{leaf}}}\right) & u_{\text{ref}} > u_{\text{leaf}}, v_{\text{ref}} < v_{\text{leaf}} \end{cases}$$

(6)

拍照高度 h 可由式(3)变换求得:

$$h = \sqrt{\frac{k}{N_{\text{ref}}} A_{\text{ref}}}$$

(7)

式中: N_{ref} 为参照物像素面积; A_{ref} 为参照物真实面积; k 为常数,可由表 1 根据 N_{ref} 分段线性插值获得。叶片和参照物间距 L 可由参考圆的半径 r 得出:

$$L = \frac{\sqrt{(u_{\text{ref}} - u_{\text{leaf}})^2 + (v_{\text{ref}} - v_{\text{leaf}})^2}}{\sqrt{N_{\text{ref}}/\pi}} \times r$$

(8)

至此,模型中 5 个参数均可得到,因此叶片和手机平面的夹角引起的误差是可校正的。

2.2 试验验证

2.2.1 仿真测试

对椭圆形模拟叶片进行算法测试,其长轴为 6 cm,短轴为 1.5~6 cm,等间隔 0.5 cm,共 10 片。模型参数如下:叶片和手机平面夹角 α 与 β 相等,分别取 0° 、 5° 、 10° 、 15° ;叶片和参照物质心连线与手机 u 轴夹角 θ 取 30° ;拍照高度 h 为 50 cm;叶片和参照物质心间距 L 取 20 cm。

叶面积测量值与理论值的总相对误差(表 2)为:

$$\epsilon_{\text{angle}} = \sqrt{\epsilon_{\alpha}^2 + \epsilon_{\beta}^2} = \frac{4L}{h} \sqrt{(\cos\theta\sin\alpha)^2 + (\sin\theta\sin\beta)^2}$$

α 与 β 同取 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时的理论相对误差分别为 0、13.9%、27.8%、41.4%。试验所得的叶面积测量值和理论值见图 3,测量值与理论值的相对误差见图 4。综合图 3 和图 4 可知,叶面积测量值与理论值之间的决策系数随叶片和手机平面夹角的增大而减小。当夹角 $< 10^\circ$ 时,测量值和理论值之间的决策系数 $> 98.7\%$,校正后的相对误差在 $-4\% \sim 6\%$;当夹角取 15° 时,决策系数为 97.92%,校正后相对误

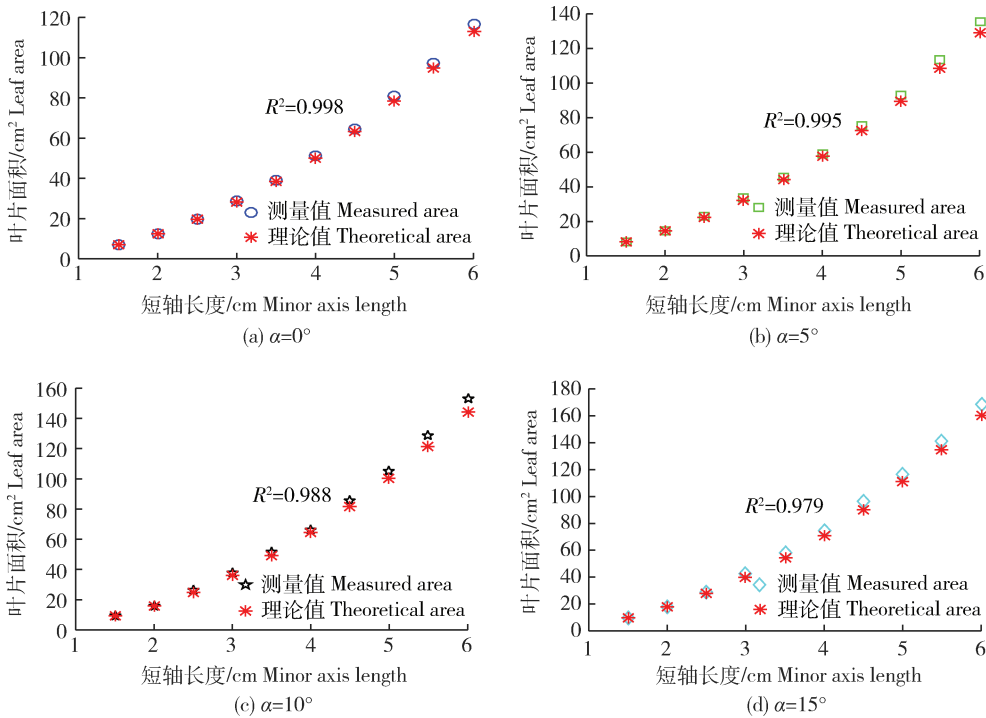


图3 叶片和手机平面夹角 α 取 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时叶面积测量值与理论值

Fig. 3 Measured area and theoretical area when camera tilt angle α is equal to 0° , 5° , 10° , 15°

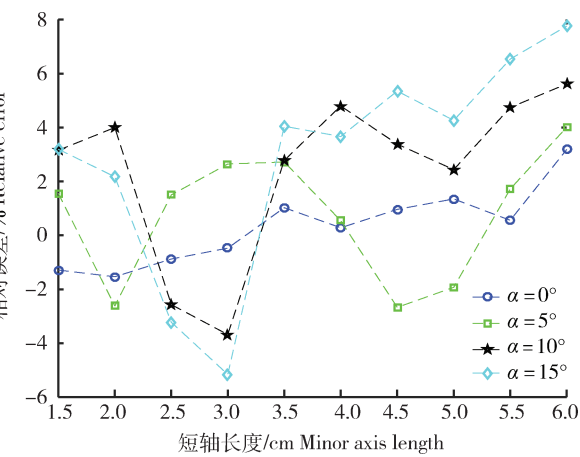


图 4 叶片和手机平面夹角 α 取 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时叶面积测量值与理论值的相对误差

Fig. 4 Relative error between measured value and theoretical value when camera tilt angle α is equal to 0° , 5° , 10° , and 15° , respectively

差为 $-6\%\sim 8\%$,误差较大的原因是,因夹角增大时参照物失真,存在较大的径向畸变,由像素面积估计出的高度 h 不准确。

2.2.2 真实植物叶片测试

选取向日葵、番茄、辣椒、茄子 4 种不同形状和大小的植物叶片进行测试,拍照高度 h 为 $35\sim 65\text{ cm}$,叶片与参照物中心间距 L 为 $10\sim 20\text{ cm}$,拍照倾斜角 $<15^{\circ}$,部分结果见表 3。可知,校正后的叶片面积相对误差为 $-6\%\sim 6\%$,而未校正的相对误差为 $-27.5\%\sim 25\%$,因此本研究提出的夹角校正方法是有效的。

3 结论与讨论

本研究在针孔相机模型基础上建立了夹角误差模型,并提出基于智能手机方位传感器的叶面积测量校正公式。以椭圆形模拟叶片和 4 种植物叶片在

表 3 植物叶片面积校正前后比较

Table 3 Comparison of leaf area measurement before and after correction

叶片编号 Leaf No.	真实面积/ cm^2 True area	未校正 Uncorrected		校正后 Corrected	
		面积/ cm^2	相对误差/ $\%$	面积/ cm^2	相对误差/ $\%$
		Area	Relative error	Area	Relative error
1	14.55	15.87	9.1	15.03	3.3
2	28.88	25.17	-12.8	27.98	-3.1
3	35.56	40.31	13.4	36.73	3.3
4	48.38	60.45	25.0	50.52	4.4
5	55.40	40.18	-27.5	52.26	-5.7
6	62.78	50.20	-20.0	59.41	-5.4
7	76.68	80.71	5.3	77.42	1.0
8	88.44	100.23	13.3	92.88	5.0
9	98.75	92.60	-6.2	96.35	-2.4
10	113.50	140.77	24.3	119.54	5.3

android 手机上进行模型验证,结果表明,使用校正公式能够有效提升测量精度,增加拍照自由度。由于手机方位传感器只能测得与水平面的夹角,本研究提出的校正方法需要将叶片摘取下来放置在水平面上,属于有损测量,支持多叶片同时测量校正。此外,夹角误差模型对于提升无损测量精度具有指导意义,活体

植物单叶片测量时尽可能使参照物靠近叶片、使相机主光轴与叶片保持垂直。当然,基于智能手机快速精确测量整株植物叶片面积还需要解决叶片倾斜,叶片重叠,以及叶片处于不同层高等问题,本研究所提出的方法仅能给出参照物位置和拍照高度的合理建议,进一步还需对整株叶面积测量进行更深入的研究。

参考文献 References

- [1] 程洪. 面向园艺应用的机器视觉目标辨识方法创新[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
Cheng H. The innovation of machine vision target identification method for horticultural application [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [2] 韩殿元. 边缘阴影和晕圈对基于图像叶面积测量的影响及修正[J]. 林业资源管理, 2010(3): 98-103
Han D Y. Influence and correction of the shadow and halo of leaf edge to image-based measurements of leaf area[J]. *Forest Resources Management*, 2010 (3): 98-103 (in Chinese)
- [3] 陶洪斌, 林杉. 打孔称重法与复印称重法和长宽校正法测定水稻叶面积的方法比较[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(3): 496-498
Tao H B, Lin S. Comparison on disc method with copy method and length-width method for measuring leaf area of rice[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(3): 496-498 (in Chinese)
- [4] 张鑫, 孟繁疆. 植物叶面积测定方法的比较研究[J]. 农业网络信息, 2008(12): 14-15
Zhang X, Meng F J. Comparative study on the measure methods of the plant leaf area [J]. *Agriculture Network Information*, 2008(12): 14-15 (in Chinese)
- [5] 宰松梅, 温季, 郭冬冬, 韩启彪, 邓忠, 孙浩. 基于支持向量机模型和图像处理技术的甜椒叶面积测定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 237-241
Zai S M, Wen J, Guo D D, Han Q B, Deng Z, Sun H. Determination of leaf area of sweet pepper based on support vector machine model and image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 237-241 (in Chinese)
- [6] 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 T T, Chi D C, LIANG Q. Multi-leaf area measurement method based on geometric correction with rectangular box. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 206-213 (in Chinese)
- [7] 王忠芝, 张金瑞. 基于图像处理的叶面积测量方法[J]. 微计算机应用, 2010, 31(5): 68-72
Wang Z Z, Zhang J R. A measurement approach of leaf area based on digital image processing [J]. *Microcomputer Applications*, 2010, 31(5): 68-72 (in Chinese)
- [8] 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
Tan F, Gao Y P. Investigation of the method for non-destructive measurement of leaf area based on image [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 170-173 (in Chinese)
- [9] Lin K Y, Wu J H, Chen J, Si H P. Measurement of plant leaf area based on computer vision[C]. In: International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Shanghai: IEEE Computer Society, 2014: 401-405
- [10] Zhang Y B, Ren H, Lü C H, Shen Y H. Leaf area measurement based on image processing[C]. In: International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha: IEEE Computer Society, 2010: 580-582
- [11] Chaudhary P, Godara S, Cheeran, A N, Chaudhari A K. Fast and accurate method for leaf area measurement [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 49(9): 22-25
- [12] Wang J W, Liu H. Measurement and analysis of plant leaf area based on image processing[C]. In: International Symposium on Information Technology in Medicine and Education. Hokkaido: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 1070-1074
- [13] Han D Y. Leaf area measurement based on markov random field [C]. In: International Conference on Computer Science and Network Technology. Changchun: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 1745-1749
- [14] 龚爱平, 吴武豪, 裴正军, 何勇. 基于 android 系统手机的叶面积测量方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 203-208
Gong A P, Wu W H, Qiu Z J, He Y. Leaf area measurement using android OS mobile phone [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 203-208 (in Chinese)
- [15] 郭文川, 周超超, 韩雯霆. 基于 android 手机的植物叶片面积快速无损测量系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 275-280
Guo W C, Zhou C C, Han W T. Rapid and non-destructive measurement system for plant leaf area based on android mobile phone [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 275-280 (in Chinese)
- [16] 徐义鑫, 李凤菊, 王建春, 花登峰, 张雪飞, 吕雄杰. 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, Lü X J. OpenCV-based measurement system for plant leaf geometry parameters using android mobile phone [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015(35): 236-244 (in Chinese)
- [17] Fusiello A. Elements of geometric computer vision[EB/OL]. (2016-05-18). <http://homepages.inf.ed.ac.uk>

责任编辑: 刘迎春