doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.040

基于多视角图像的植物叶片建模与曲面面积测量*

张卫正[1]　徐武峰[2]　裘正军[1]　吴　翔[1]　吴武豪[1]　何　勇[1]

(1.浙江大学生物系统工程与食品科学学院,杭州 310058; 2.许继集团许继电源有限公司,许昌 461000)

摘要:针对现有测量植物叶片面积方法会对叶片造成一定程度的损伤,提出一种直接对自然生长状态下的叶片进行测量的方法。首先,对数码相机进行校正获取相机参数,从多角度拍摄自然生长状态下的叶片;然后,利用 PhotoModeler 软件对图像进行处理,获得叶片三维点云模型;再利用 Matlab 编程实现叶片的三维曲面建模并计算曲面面积。将该测量结果与采用扫描仪结合 Photoshop 测量结果进行了对比,实验结果表明,提出的方法对自然状态下的叶片测量效果良好,精度达 99%。

关键词:植物叶片　面积测量　图像处理　相机校正　曲面建模

中图分类号:TP391.41; S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)07-0229-06

Plant Leaf Modeling and Surface Area Measuring Based on Multi-view Images

Zhang Weizheng[1]　Xu Wufeng[2]　Qiu Zhengjun[1]　Wu Xiang[1]　Wu Wuhao[1]　He Yong[1]

(1. *School of Biosystems Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*

2. *XJ Group Corporation XJ Power Co.*, *Ltd.*, *Xuchang* 461000, *China*)

Abstract: The existing methods of leaf area measuring would cause certain damage to the leaf, so a measurement method of the leaf area in natural growing state was put forward. The digital camera was calibrated to get camera parameters; then leaf images at various angles in natural growing state were shot and processed by PhotoModeler software. The 3-D point cloud model of leaf was built up. The 3-D surface modeling and surface area calculating of leaf were achieved by using Matlab software. The measuring results and the calculating results with combination method of scanner and Photoshop software were compared. It showed that the accuracy of calculating results reached to 99%.

Key words: Plant leaf　Area measurement　Image processing　Camera calibration　Surface modeling

引言

叶片作为植物光合作用、蒸腾作用和合成有机物质的主要器官,其发育状况和叶面积大小对作物生长发育、抗逆性及产量形成的影响很大,是生理生化、遗传育种、作物栽培、害虫危害损失等予以关注的研究内容[1~2]。建立简便、快速、准确的叶面积测定方法,对指导作物栽培密度及施肥水平,植物生理生化等研究和应用具有重要意义。

目前,叶面积测定方法很多,常用的有求积仪法、透明方格法、称量法[3]、经验公式法[4]、叶面积仪法[5]、数字图像处理法[6]等。其中求积仪法、透明方格法、称量法这 3 种传统的叶面积测定方法,操作简单、易行,要求的仪器设备简单,但费时费工,透明方格法和称量法测定结果的准确性和精确性较低。经验公式法测算叶面积具有操作简便快捷、实用性强的优点,但该方法要进行大量的采样才能得出计算式,对被测叶片的预测结果准确性不高,另外不同的植物叶片要建立不同的经验公式,工作量大大增加。叶面积仪法精度高,操作简单,但属于接触式测量,不能得到叶片色彩信息,叶片面积较大时超出量程,无法实现测量。数字图像处理法可获得叶

收稿日期:2013-01-20　修回日期:2013-03-04

*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101903)、国家自然科学基金资助项目(30600371)和教育部重点资助项目(109090)

作者简介:张卫正,博士生,主要从事生物生长信息采集处理技术研究,E-mail:weizheng008@126.com

通讯作者:裘正军,教授,博士生导师,主要从事农业信息技术研究,E-mail:zjqiu@zju.edu.cn

片色彩信息,测量精度较高,测量范围广,可对不同大小的叶片进行测量,但都需要将叶片压平,从而进行二维测量,这样会对被测量的植物叶片组织产生一定程度的破坏。

本文提出基于机器视觉技术的叶片建模测量方法,首先校正相机误差,然后用相机从多个角度对自然生长状态下的叶片进行拍照,接着对图像进行校正,利用相关匹配算法得到叶片曲面的三维点云模型,最后采用 Matlab 软件对叶片进行三维建模及计算叶片三维曲面面积。

1 相机及标定

实验采用尼康 D90 型数码相机,其分辨率为 4 288 像素 ×2 848 像素,焦距固定为 20 mm,输出的图像格式是 JPEG。数码相机存在几何畸变差等光学缺陷,导致计算结果不准确甚至迭代算法不收敛。因此,应用数码相机进行建模及测量之前,必须对其进行严格的标定[7]。

有多种方法可以对相机进行标定,本文采用 PhotoModeler 软件提供的检校程序进行相机标定,该软件由加拿大 EOS system 公司生产。PhotoModeler 软件除了可以标定相机,同时还提供了照片建模技术,对建模对象拍摄 2 张以上的照片,利用前方交汇的方法,经过相机标定[8]、图像匹配[9]、空间点计算[10]3 个步骤,重建已知场景的三维点云。数码相机标定包括像主点位置、光学畸变系数的测定。其公式为

$$\begin{cases}\Delta x=(x-x_0)(k_1^2+k_2^4)+p_1[r^2+2(x-x_0)^2]+\\ \quad 2p_2(x-x_0)(y-y_0)\\ \Delta y=(y-y_0)(k_1^2+k_2^4)+p_2[r^2+2(y-y_0)^2]+\\ \quad 2p_1(x-x_0)(y-y_0)\end{cases} \tag{1}$$

其中 $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$

式中 x、y——像点坐标

x_0、y_0——像主点坐标

k_1、k_2——径向畸变系数

p_1、p_2——切向畸变系数

相机的检校解算采用附坐标改正的直接线性变换模型,其公式为

$$\begin{cases}x-x_0+\Delta x+\dfrac{XL_1+YL_2+ZL_3+L_4}{XL_9+YL_{10}+ZL_{11}+1}=0\\ y-y_0+\Delta y+\dfrac{XL_5+YL_6+ZL_7+L_8}{XL_9+YL_{10}+ZL_{11}+1}=0\end{cases} \tag{2}$$

式中 X、Y、Z——点的物方空间坐标

L_i——直接线性变化参数,$i=1,\cdots,11$

将式(1)代入式(2),建立相应误差方程,平差解算出相应的内方位元素和光学畸变系数,完成相机的检校。

利用 PhotoModeler 软件提供的校准网格可较高精度地标定相机的内方位参数。如图 1 所示,校准网格由 96 个控制点和 4 个标识点组成。其中控制点是实心圆点,控制点之间距离相等,规则布满整个网格,软件可自动计算出控制点的圆心,从而进一步计算相机参数。标识点如图 1 中的 a、b、c、d 所示,由实心圆点和与圆点同圆心的呈特定方向与角度的多条弧形粗线组成,同一个项目中使用的标识点的形状都是不同的。标识点目标较大,软件可轻松识别,因此坐标系的原点通常建立在 4 个标识点之中的任意一个上。

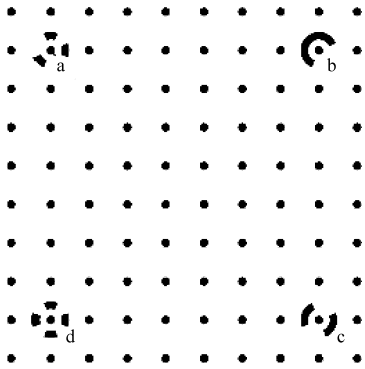

图 1 校准网格图像

Fig. 1 Calibration of grid image

将校准网格图像打印在一张 210 mm ×297 mm 的纸上,控制点直径为 4 mm,控制点之间的间距为 20.4 mm,标识点最外圈的直径为 14 mm,弧形粗线宽度为 2.5 mm。将纸张放在平坦的平面上,将相机固定在三脚架上,然后拍摄标准网格板,大致保持镜头主光轴与标准网格板呈 45°角,如图 2 所示。

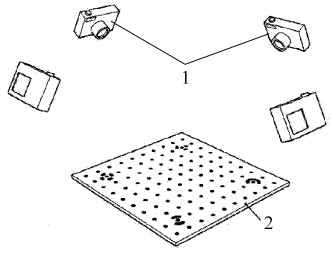

图 2 相机的位置及角度

Fig. 2 Positions and angles of camera

1. 相机 2. 校准板

从 4 个方向拍摄 4 个横幅照片,再以镜头主光轴为轴分别顺时针和逆时针旋转 90°,各拍摄 4 幅纵幅相片,共拍摄 12 张图片,如图 3 所示。对图 3 中的标识点和控制点进行识别,得到图 4。

利用 PhotoModeler 软件提供的标定程序,可得

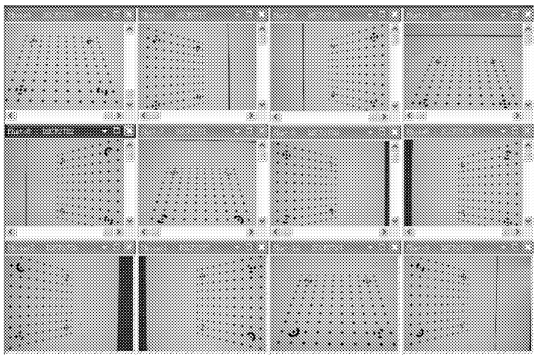

图 3　从不同角度拍摄的多幅标准网格

Fig. 3　Multiple standard grid plate photos taken from different angles

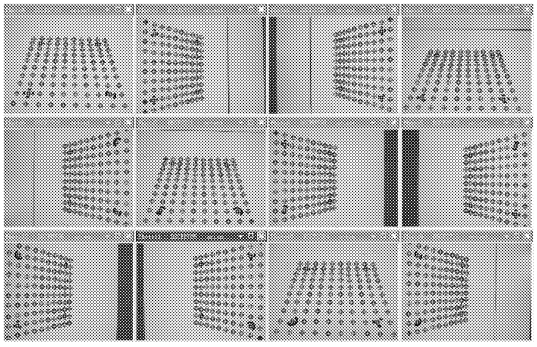

图 4　检测标识点与控制点

Fig. 4　Detection of sign points and control points

到表 1，其中 f 是焦距[11~12]。

表 1　主要参数的校正结果

Tab. 1　Calibration results of main parameters

参数	数值	偏差
f/mm	21.236 822	0.015
x_0/mm	12.082 472	0.004
y_0/mm	7.943 721	0.004
k_1	2.701×10^{-4}	2.6×10^{-6}
k_2	-3.935×10^{-7}	1.5×10^{-8}
p_1	1.942×10^{-5}	2.1×10^{-6}
p_2	1.500×10^{-5}	2.3×10^{-6}

2　图像获取与三维点云构建

实验采用斜纹亮丝草花的叶片，叶片放置在平整木板之上，四周由布满标识点的条带围绕，每个标识点条带由 13 个标识点组成，各个标识点中心之间的距离为 2.04 mm，标识点条带长 297 mm，4 个条带组成正方形。斜纹亮丝草花的叶片自然放置在条带上面，从垂直于叶片长轴的 2 个方向各拍摄 2 张照片，如图 5 所示。

对相机进行标定之后，利用得到的校正参数及相关的几何校正数学模型对叶片图像进行校正，校正前后的对比效果如图 6 所示。

从图 6 可以明显看到校正后的图像边缘向内收

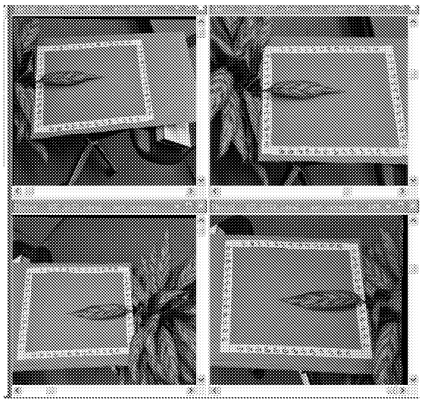

图 5　叶片图像

Fig. 5　Leaf images

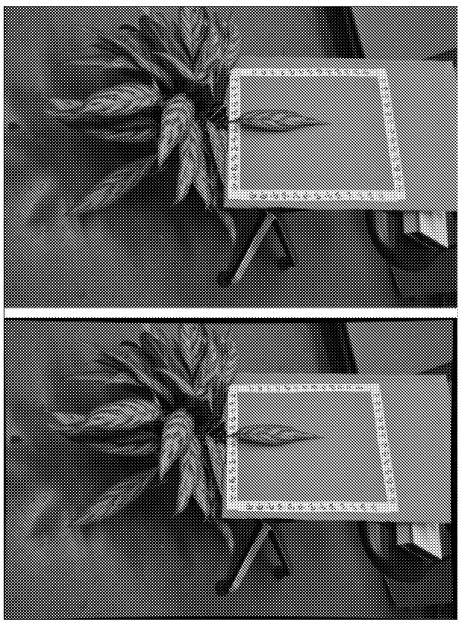

图 6　校正前后的对比

Fig. 6　Comparison before and after correction

缩，这是由于校正了误差，图像恢复到了准确位置。由校正后的叶片图像得到叶片的三维点云后，必须进行多角度拍摄叶片图像的同名点匹配[13~14]，在测量过程中，先由摄像头分别对被测表面上同一点进行测量，将测量结果转入同一坐标系下，然后进行比较，检查两者误差是否在允许范围内。测量采用了双目成像原理，见图 7。

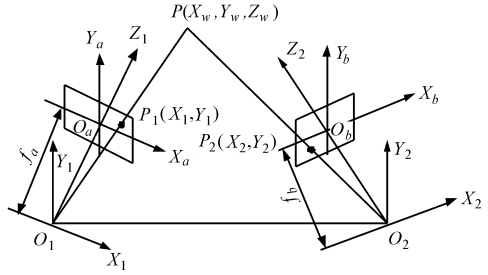

图 7　双目立体成像原理

Fig. 7　Principle of binocular stereo imaging

空间中一点 P，在左坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下的坐标

为(X_1,Y_1,Z_1),在右坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 下的坐标为(X_2,Y_2,Z_2)。同一空间点在 2 个坐标系中存在关系式

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{T}$ 分别为旋转和平移矩阵,均由摄像机内部参数确定。将图 5 中每幅图像的特征点提取出来,根据双目立体成像原理建立特征点之间的对应关系,从而实现同一个物理点在不同图像中的映像对应。

通过上述方法,识别出 4 幅图像的标识点,如图 8所示。从而进一步得到 4 幅叶片图像上叶子的点云模型如图 9 所示,将三维点云模型导出为 TXT 格式文件,以用于 Matlab 的建模和计算。

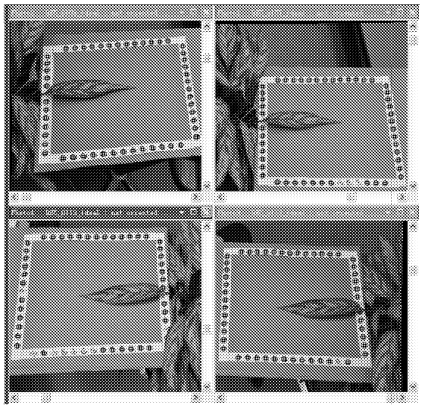

图 8 标识点的识别

Fig. 8 Identification of mark points

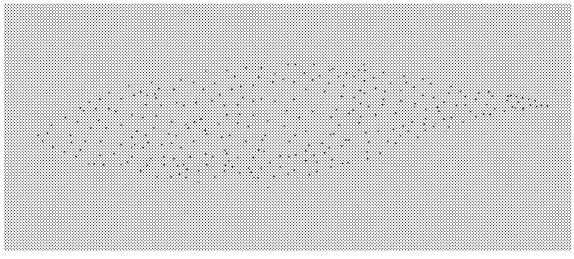

图 9 叶子的点云

Fig. 9 Point cloud of leaf

3 三维曲面建模

可以通过多种方法建立叶片的曲面模型,本文采用 Delaunay 三角网技术。Delaunay 三角剖分具有良好的数学特征,剖分出来的三角形网格均匀,可以表示线性特征和迭加任意形状的区域边界,易于更新,可适应各种分布密度的数据,能够较好地反映物体表面的起伏变化[15~16]。

由于 Delaunay 三角网尽可能避免病态三角形的出现,从而保证了网格整体质量最优以及有限元迭代算法的稳定可靠。三角网生长法的中心思想是任取一点,找到与它最近的一点连成一条直线,然后找到离这条直线最近的点连成三角形,从这个三角形的边出发,各自寻找离它们最近的点连成三角形,依次扩展,直到所有的离散点都构网为止。比较有代表性的是 Brassel 等[17]和 McCullagh 等[18]提出的方法。逐点插入法是动态 Delaunay 三角网的主要生成算法,最早由 Lawson 提出,其算法的过程非常简单,而且也很好理解。逐点插入法的核心思想是将未处理过的离散数据点逐一插入到一个已存在的 Delaunay 三角网内,然后再进行优化,从而完善这个三角网。目前主流 Delaunay 三角网生成算法都采用逐点插入法,构建一个包含了所有离散数据点的矩形或初始超三角形作为初始三角网,只是初始 Delaunay 三角网的设定和数据的结构略有不同。以先构建一个超三角形作为初始三角网为例,逐点插入算法的基本步骤是:

(1) 构建一个包含所有离散数据点的超三角形,将其作为初始三角形。

(2) 从离散点集中选取一个未处理过的点 P 插入到已存在的 Delaunay 三角网内。

(3) 在这个三角网中定位出包含 P 的三角形,将其 3 个顶点与 P 相连,进而生成 3 个新的三角形。

(4) 运用 Lawson 提出的 LOP 算法向外优化之前所生成的三角形。

(5) 重复步骤(2)~(4),直到所有的离散数据点都插入完毕。

(6) 最后删除与超三角形 3 个顶点相关的所有三角形。

Delaunay 三角网的逐点插入构网算法在实际的生成过程中,有个重要的思路:每次插入一个新的数据点 P 以后,找到包含这点的三角形 T,将 P 和其所在的三角形 T 的 3 个顶点相连接,形成 3 个新的三角形[19]。最后得到自然状态下的叶片曲面模型如图 10 所示。

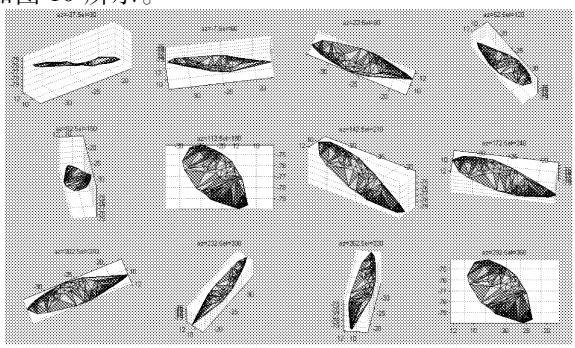

图 10 不同视角的叶片 Delaunay 三角网模型

Fig. 10 Delaunay triangulation model of leaf from different views

4　结果与分析

通过构建 Delaunay 三角网，叶片点云中的各个点全部成为三角网中的所有小三角形面片的顶点，三角形面片的各个顶点坐标即点云中点的坐标是已知的，通过已知的三角形面片各个顶点坐标计算三角形面片的面积，然后把所有三角形面片的面积相加，从而得到叶片曲面模型的面积为 59.359 4 cm^2。

为了评价测量精度，采用一种扫描仪结合 Photoshop 软件的方法测量同一片叶片的面积，扫描仪为惠普扫描仪，型号为 HP Laser Jet M1005 MFP，Photoshop软件的版本为 CS3。先用扫描仪对该叶片进行离体扫描，叶片的背景部分放置一张 A4 纸，纸的大小为 210 mm ×279 mm，扫描得到图 11。

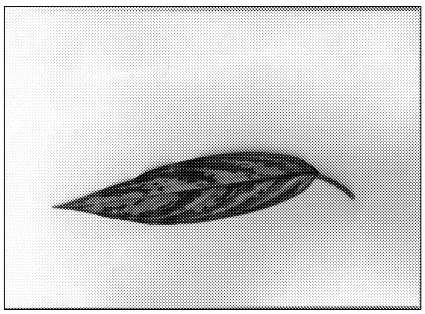

图 11　扫描仪得到的叶片影像

Fig. 11　Leaf image by scanner

可由 Photoshop 查看 A4 纸的宽度为 210 mm，占用 4 954 个像素，可得到图 11 中每一个像素宽度。利用 Photoshop 提供的工具对叶片进行描边，如图 12 所示，然后统计压平后叶片所占像素数为 3 303 412，计算可得叶片面积为 59.341 2 cm^2。

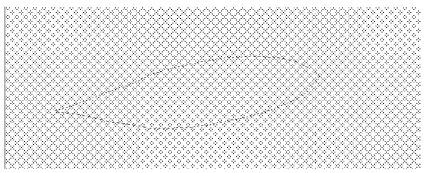

图 12　用 Photoshop 获取的叶片边缘

Fig. 12　Leaf edge by Photoshop

采用同样的方法对同类型 20 片叶子进行对比测量，测量结果如表 2 所示。

从表 2 可知，2 种测量方法得到的数据非常接近，相对误差小于 1%。采用本文建模测量的方法比扫描仪结合 Photoshop 软件的方法测得的数据普遍大了一点，分析其原因，扫描仪在扫描叶片时，叶片没有完全压平、没有完全伸展开，导致测得结果偏小一些，而建模测量的方法，得到的是叶片的三维曲面模型，测得的曲面面积更接近叶片真实值，精度高达 99% 以上。

表 2　20 组对比测量结果

Tab. 2　20 groups of comparative measurements

叶片序号	扫描仪结合 Photoshop 法	建模测量法	不同方法的精度比较/%
1	53.614 8	53.790 1	99.67
2	61.692 7	61.871 3	99.71
3	55.387 4	55.726 2	99.39
4	56.034 1	56.194 5	99.71
5	60.119 2	60.361 1	99.60
6	58.035 2	58.397 3	99.38
7	49.266 5	49.536 9	99.45
8	63.142 3	63.418 7	99.56
9	59.482 6	59.642 1	99.73
10	54.948 7	55.094 4	99.74
11	63.881 2	64.263 8	99.40
12	56.245 3	56.393 1	99.74
13	57.878 3	58.033 6	99.73
14	52.432 5	52.675 3	99.54
15	53.940 1	54.119 7	99.67
16	56.404 7	56.746 2	99.40
17	53.004 9	53.264 3	99.51
18	57.094 9	57.257 8	99.72
19	59.740 6	59.941 5	99.66
20	61.366 8	61.530 8	99.73

5　结论

（1）提出的方法可以在不采摘叶片的情况下，建立叶片的三维曲面模型，并计算叶片三维曲面面积，实现了对叶片的无损测量。在输入信息量及其可获取性方面，扫描仪结合 Photoshop 软件的方法输入信息量少，获取方便，处理起来很简单。

（2）提出的建模测量方法只要从两个角度拍摄的照片便能实现建模，为了实现更好的建模效果本实验从 4 个角度拍照获取图像，实验中输入的信息量不大，获取方便，处理方法快捷，结果精度高达 99% 以上。

（3）在对测量精度要求较高的情况下，也可以实现自然生长状态下叶片表面积的测量。此外对较大面积的叶片也能进行建模及测量。可广泛应用于多种植物叶片的测量，也为虚拟植物建模等相关研究做了准备工作。对于高度较高的植物叶片的图像采集不是特别方便，另外布满标识点的条带及背景板还可做一些改进，以便于背景及场景稳定，便于相机拍摄。

参 考 文 献

1 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 Aijun, Li Dongsheng, Dong Guanghui. A system for plant leaf parameter measure based on MATLAB [J]. Journal of China University of Metrology, 2010, 21(4): 310 ~ 313. (in Chinese)

2 S H Jo, K S Rhim, I H Oh. Measuring tobacco leaf area by numerical integration of asymptotic regression equations [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(1): 107 ~ 109.

3 Patrick Meir, John Grace, Antonio C Miranda. Photographic method to measure the vertical distribution of leaf area density in forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(2 ~ 3): 105 ~ 111.

4 宰松梅,温季,郭冬冬,等.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 Songmei, Wen Ji, Guo Dongdong. 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)

5 聂鹏程, 杨燕, 刘飞, 等. 植物叶面积无损测量方法及仪器开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 198 ~202.
Nie Pengcheng, Yang Yan, Liu Fei, et al. Method of non-destructive measurement for plant leaf area and its instrument development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 198 ~202. (in Chinese)

6 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,2006,42(27):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, 42(27): 194 ~196. (in Chinese)

7 程效军,许诚权,周行泉. 基于 PhotoModeler Scanner 的普通数码相机快速检校研究[J]. 遥感信息, 2011 (4): 80 ~84.
Cheng Xiaojun, Xu Chengquan, Zhou Xingquan. Fast calibration method of ordinary digital camera based on the PhotoModeler Scanner[J]. Remote Sensing Information, 2011(4): 80 ~84. (in Chinese)

8 Hanke Klaus. Accuracy study project of EOS systems' PhotoModeler[R]. University of Innsbruck, Austria, 1998.

9 Gruen Armin, Huang T S. Calibration and orientation of cameras in computer vision[M]. Berlin: Springer Verlag, 2001.

10 周博, 郑加强, 周宏平. 树木图像拼接系统特征点匹配[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 195 ~198.
Zhou Bo, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Tree image mosaicing system based on featured area matching [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (10): 195 ~198. (in Chinese)

11 王永强,吕乃光,邓文怡,等. 大尺寸视觉测量系统在线标定的新方法[J]. 光学技术,2007, 33(1):86 ~88.
Wang Yongqiang, Lü Naiguang, Deng Wenyi, et al. The new online calibration method in large-scale video grammetry system [J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 86 ~88. (in Chinese)

12 Faugeras O, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments[C]// Computer Vision-ECCV'92, 1992: 321 ~334.

13 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

14 朱庆生, 刘然, 许小艳,等. 平面图像立体化研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2 814 ~2 818.
Zhu Qingsheng, Liu Ran, Xu Xiaoyan, et al. Research on image conversion from planar to stereo[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29 (12): 2 814 ~2 818. (in Chinese)

15 刘士和, 罗秋实, 黄伟. 用改进的 Delaunay 三角化方法生成二维非结构网格[J]. 武汉大学学报:工学版, 2005, 38(6): 1 ~5.
Liu Shihe, Luo Qiushi, Huang Wei. Generation of 2-D nonstructural grid by modified Delaunay method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38 (6): 1 ~5. (in Chinese)

16 王成恩. 面向科学计算的网格划分与可视化技术[M]. 北京: 科学出版社,2011.

17 Brassel K E, Reif D. A procedure to generate TIN polygons[J]. Geographical Analysis, 1979, 11(3):289 ~303.

18 McCullagh M J, Ross C G. Delaunay triangulation of a random set of data for isarithmic mapping[J]. The Cartographic Journal, 1980, 17(2): 93 ~99.

19 Chen Jianjun, Zheng Yao. Redesign of a conformal boundary recovery algorithm for 3D Delaunay triangulation[J]. Journal of Zhejiang University—Science A, 2006, 7(12): 2 031 ~2 042.