

基于三维点云的叶面积估算方法

苏宝峰^{1,2} 刘易雪^{1,2} 王琮^{1,2} 米志文^{1,2} 王方圆³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 为实现低成本无损精确测定叶片面积, 基于运动恢复结构算法获取点云, 提出了一种融合叶片点云分割、表面重建及叶片面积无损估测等过程的植物叶片面积提取方法。首先, 基于运动结构恢复算法, 以智能手机获取的可见光图像重建植物的三维点云; 其次, 为了还原叶片表面形状, 基于 HSV 颜色空间, 使用阈值分割法去除叶片点云的噪点; 使用 K-means 聚类算法对点云的三维坐标矩阵进行分类, 实现单片叶片点云的分割; 基于滚球算法重建叶片的表面网格模型; 最后, 通过计算网格面积求得叶片面积。与常规叶面积测定方法进行了对比, 本文方法的计算结果与扫描叶片法测定值相比平均误差为 1.21 cm², 误差占叶片面积的平均百分比为 4.67%; 与叶形纸称量法测定值相比平均误差为 1.41 cm², 误差占叶片面积的平均百分比为 6.05%。结果表明, 本文方法成本低、精确度高, 可满足植物叶片面积无损精确测定的需求。

关键词: 植物表型; 叶面积; 三维重建; 点云处理; 运动结构恢复算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0240-07

Leaf Area Estimation Method Based on Three-dimensional Point Cloud

SU Baofeng^{1,2} LIU Yixue^{1,2} WANG Cong^{1,2} MI Zhiwen^{1,2} WANG Fangyuan³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the study of 3D plant phenotyping, with the efficiency of plant phenotype improving, 3D reconstruction technology has become a novel direction to obtain blade morphology at present. However, the traditional method of reconstructing 3D model such as laser scanner, structured light image and binocular stereo vision system is expensive and complicated. A new method extracting plant leaf area was proposed based on point cloud obtained by using structure from motion. Smart phone was used to get images of plants. Based on these images, the three-dimensional point cloud of plants was reconstructed by using structure from motion algorithm. In order to restore the surface shape of the leaf, firstly, the noise of the leaf point cloud was removed by using threshold segmentation algorithm based on HSV color space. Secondly, the three-dimensional coordinate matrix of point cloud was classified by using K-means clustering algorithm to segment single leaf point cloud by classifying. And then, the surface mesh model of the leaf was reconstructed by using the ball pivoting algorithm. At last, the leaf area was obtained by calculating the mesh area. To evaluate the proposed method, it was compared with the conventional leaf area measurement method. The average error of the calculation result of the proposed method was 4.67% compared with the measured value by using the scanning method, and the average error was 6.05% compared with the measured value by using the leaf-shape paper weighing method. In addition, the method of calculating leaf area by extracting contour by Canny edge detection algorithm was compared with the proposed method. The results showed that the proposed method required low cost and high precision, and met the requirements of non-destructive and accurate determination of plant leaf area.

Key words: plant phenotyping; leaf area; three-dimensional reconstruction; point cloud processing; structure from motion

0 引言

提高植物表型的获取效率是研究植物生理机制过程亟待解决的问题。植物表型数据的缺失限制了研究人员对数量性遗传性状分析的能力^[1-2]。借助智能化设备鉴定植物表型是智慧农业的重要组成部分^[3-4]。叶面积的测定是植物生理机制研究中一项基本测定,无损鉴定植物的叶面积可为研究植物的光合效率等生理机制提供数据支撑^[5]。

目前较为流行的叶面积测定方法为使用手持设备、通过单一图像处理的方式测定叶片面积^[6-7]。然而,从单一图像测定叶面积的方法不能满足表型数据高通量获取的要求,利用三维重建结构技术获取叶片形态成为研究无损估测叶面积的新方向^[8-11]。

目前常见的三维点云获取设备主要有基于激光扫描原理的 FastScan、Vivid9i,利用结构光获取对象深度信息原理的 Microsoft Kinect、3D Scanner 等仪器以及基于双目相机的立体视觉系统^[12-22]。文献[16]通过三维扫描仪完成了对苹果叶片的三维重建。文献[17]使用 FastScan 对烟草植株进行扫描,得到烟草植株的三维结构。文献[18]把获取的深度信息和颜色信息进行配准后,获得了包含颜色和纹理信息的油菜三维重建模型。文献[19]改进了使用 Kinect 重建植株三维点云的配准方法。文献[20]使用消费级深度相机对玉米植株进行了三维重建,并提出了去噪方法。文献[21]使用 Kinect 重建了玉米的三维模型,并提出了有效去除离群点的方法。文献[22]提出了一种基于双目视觉的能量最低模型,以此估计植物的叶面积、高度及地上生物量。

然而,这些方法均存在成本较高、对应用环境要求苛刻等问题。使用激光扫描仪虽然可以获得精确的三维点云,但所需成本高,数据处理过程繁琐,适用性不强;基于结构光的深度图像系统对光照环境的配置要求高;双目立体视觉系统使用前需人工校正相机。运动恢复结构算法的提出降低了对点云获取设备和环境的要求,可基于消费级相机获取的多幅图像实现三维重建^[23]。文献[24]使用运动恢复结构算法对株高大于 50 cm 大豆和向日葵进行三维重建,并对整株植株进行了分割。虽然详细地描述了点云获取过程,然而针对点云分割处理的问题,仅分割出植株上的叶片,未能分割出单一叶片。

针对上述问题,本文提出面向智能手机平台获取图像进行植物 3D 表型信息提取的方法。该方法通过运动恢复结构(Structure from motion, SfM)对智

能手机获取的图像进行处理,获取点云数据,针对点云数据处理问题,采用颜色特征阈值分割算法实现点云去噪,采用聚类算法实现点云分割;针对离散点云的表面重建问题,采用滚球算法对点云进行表面重建,得到网格模型,以实现叶片面积的计算。

1 材料和方法

1.1 材料

以 3 株株高约为 30 cm 的盆栽赤霞珠葡萄植株为对象,编号 1、2、3,1 号植株叶片数量为 5,叶片重叠率较低;2 号植株的叶片数量为 9,叶片重叠率适中;3 号植株的叶片数量为 10,叶片重叠率较高,如图 1 所示。



图 1 实验用盆栽赤霞珠葡萄植株

Fig. 1 Potted Cabernet sauvignon grape

本文使用图像采集平台为 iPhone xs Max。依赖其 f/1.8 光圈的 1 200 万像素主广角镜头采集图像。为保证图像采集平台的可替代性,拍摄模式采用默认的自动对焦方式,禁止闪光,禁止获取 HDR 图像。先经过预备实验,手持手机在距葡萄树苗 0.5 m 的范围内连续采集图像以获取更多的细节信息。采集的图像尺寸为 3 024 像素×4 032 像素,图像的文件格式为 JPG。1 号植株采集了 78 幅图像,记为 1 号图像集;2 号植株采集了 65 幅图像,记为 2 号图像集;3 号植株采集了 109 幅图像,记为 3 号图像集。

1.2 基于运动恢复结构算法的点云获取

针对使用普通消费级相机重建目标三维模型的问题,运动恢复结构算法是一种常见的三维重建方法,是一种利用存在信号耦合的图像序列估测目标物体三维结构的摄像测量技术。

运动恢复结构算法使用 SIFT 算法完成图像特征点匹配。SIFT 算法通过提取局部图像特征处理图像平移、旋转尺度变换的干扰问题,降低对图像拍摄的要求。提取特征点(基于高斯差分法的尺度空间极值点)后对提取到的特征点附加详细信息,再通过两幅图像间的特征点找出匹配对,建立物体间的对应关系^[25-26]。检测两幅图像的所有特征点,计算第 2 幅图像特征点的特征向量集合与第 1 幅图像特征点特征向量集合的欧氏距离,然后对获得的所

有欧氏距离进行比较,其中最小的欧氏距离对应特征向量的特征点就是两幅图像所匹配的特征点^[27]。

使用 RANSAC 算法求解出相机姿态,剔除错误的匹配对^[28]。求出相机的姿态矩阵后,使用三角测量算法恢复匹配特征点所对应的三维点坐标。三角测量算法是利用最小化图像点和三维坐标点在图像上的预测坐标间的误差平方和来寻找最优解,它的目标函数为 $\arg \min \sum_{i=1}^n \|u_i - \mathbf{K} \mathbf{P}_i X\|^2$ 。其中, X 为三维坐标, u_i 为观测到的图像点, $\mathbf{K}$ 为内参数矩阵, $\mathbf{P}_i$ 为第 i 幅图像对应的相机矩阵。

当所有图像对特征点匹配完成后,通过光束平差算法再次计算相机的内部参数以及相机位置,得到稀疏点云。通过对三维点云的位置和相机姿态作为优化参数建立代价函数,求解代价函数的最优解来对三维点云和相机姿态进行全局优化,来得到整体结构最优的三维点云和相机姿态。建立的目标函数为 $\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\hat{x}^j - \mathbf{K} \mathbf{P}_i X^j)^2$ 。其中, $\hat{x}^j$ 为第 i 幅图像中的第 j 个三维测量点。

使用光束平差算法优化后,对稀疏点云对应的特征点周围像素进行扩展,形成密集点云。

目前能实现运动恢复结构算法的软件有 OpenVMS、Pix4D Mapper、Agisoft PhotoScan 等。本文选择 Agisoft PhotoScan 软件进行点云获取。将 3 个图像集分别导入 Agisoft PhotoScan 对 3 株葡萄进行三维重建,重复验证本文所提方法。使用 Agisoft PhotoScan 中的长度测量工具测量标尺长度,与实际值换算得出点云数据的比例尺。

1.3 叶面积计算

处理点云数据实现叶面积的计算过程如下:①分割背景点云。②基于 HSV 颜色空间使用阈值分割法去除植株点云的噪点。③使用 K-means 聚类算法对点云的三维坐标矩阵进行分类,实现单片叶片点云的分割。④基于滚球算法重建了叶片的表面网格模型。⑤通过计算网格面积求得叶片面积。

1.3.1 背景点云分割

针对密集点云数据繁杂背景分割的问题,使用 MeshLab 中的滤波器工具提取葡萄盆栽的点云,去除背景点云。

1.3.2 植株点云去噪

噪点主要存在于叶片表面周围以及下侧,主要源自叶片表面反光导致的特征点匹配错误产生的错误点以及在叶片遮挡下枝干的特征点匹配错误产生的错误点。噪点的颜色特征区别于叶片点云特征,因此将颜色特征作为阈值区分出噪点。使用 Matlab

Color Threshold 工具箱提取叶片的颜色阈值创建掩膜函数。选取 HSV 颜色空间作为特征,在 Color Threshold 可视化界面中,提取叶片颜色特征边界值,通道 1 的阈值范围为 [50.623, 83.666],通道 2 的阈值范围为 [-41.963, -12.479],通道 3 的阈值范围为 [-25.137, 39.775],创建掩膜矩阵 $\mathbf{B}_w$ 。以点云数据的颜色矩阵 $\mathbf{C}$ 为对象,生成新的颜色矩阵 $\mathbf{R}$ 。以掩膜矩阵 $\mathbf{B}_w$ 为索引,生成这些点新的坐标矩阵 $\mathbf{L}$ 。将矩阵 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{L}$ 写为点云格式,得到去噪后的植株点云。

1.3.3 单个叶片点云分割

根据叶片在植株上的分布情况,任意两片叶片间存在一定距离,采用无监督聚类算法完成单片叶片点云的分割工作。对经过去噪处理后的植株点云使用 K-means 算法对点云数据的三维坐标矩阵进行分类。K-means 算法的目标是把 n 个样本点划分到 k 个不同类簇里,在样本中随机选取 k 个初始中心,然后对靠近它的点进行归类,通过迭代的方法,每次在每个聚类中重新计算中心值,然后再比较聚类中心间的距离,直到达到所设定的收敛条件后聚类结束。对应不同的植株,在分割时将 k 值设置为对应的叶片数量。

1.3.4 叶片点云表面重建

为了还原不规则叶片表面形状,针对叶片表面卷曲不平整的问题,以单个叶片离散点云为对象,使用滚球算法 (Ball pivoting) 重建叶片的表面网格模型。滚球算法的原理是首先在点云中随机寻找到一个种子三角形,然后滚球算法会在这个种子三角形边界内滚动一个预先给定直径的小球,当这个小球碰到三角形边界外的另外一个点时就组成另外一个三角形。滚球算法的收敛条件是当所有的边界都被滚动到且没有多余的点再组成三角形^[27]。根据点云的密集程度,设置收敛条件为小球半径为聚类半径的 20%,最大阈值角度为 90°,在 MeshLab 中实现这一算法。

1.3.5 叶片面积计算

通过统计叶片表面的三角网格面积计算出叶片的表面积。使用 Matlab 处理点云表面模型,基于海伦凯勒公式计算得到单个网格三角形的面积以求得叶片面积。计算网格面积公式为

$$S = \sum_{r=1}^n A(r)$$

(1)

式中 A ——每个三角网格的面积, cm^2
 r ——三角网格序号
 S ——植物叶片的总面积, cm^2
 n ——三角网格总数

通过植物的三维模型比例尺的比例变换得出植物叶片面积的计算值。

2 实验结果分析

2.1 点云获取结果与处理

使用 1.2 节中的点云获取方法获取葡萄植株的三维点云数据与相机姿态如图 2 所示。

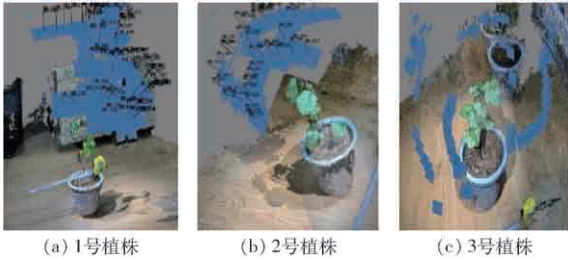


图 2 三维重建结果
Fig. 2 Result of 3D reconstruction

对于 1 号植株,校对 78 幅图像后,生成 34 508 个特征点,得到了 3 329 326 个密集点云;对于 2 号植株,校对 65 幅图像后,生成了 33 791 个特征点,得到了 3 566 248 个密集点云;对于 3 号植株,校对 109 幅图像后,生成了 79 567 个特征点,得到了 4 017 324 个密集点云。由结果可以看出,使用运动恢复结构算法处理可见光图像可以恢复出目标的三维实景模型,重建效果好。这种三维重建的方法对原始图像采集平台以及采集方式的要求低,便于操作。

使用 MeshLab 点云滤波器工具对葡萄叶片区域进行了提取,结果如图 3 所示。在 Matlab 中对叶片点云进行去噪处理,结果如图 4 所示。对于 1 号植株,去噪前的点云数量为 19 229,去噪后的数量为 12 596;对于 2 号植株,去噪前的点云数量为 78 787,去噪后的点云数量为 53 696;对于 3 号植株,去噪前的点云数量为 12 3045,去噪后的点云数量为 103 852。结果表明,本文方法是有效的,经过去噪处理后,植株点云更加平滑,噪声明显减少。

单个叶片分割结果如图 5 所示。从分割结果来看,本文所提分割方法适合离散分布的叶片点云的分割。

叶片表面重建结果如图 6 所示。重建结果表明,使用滚球算法可以满足还原叶片的形状的需求,得到接近实际的叶片表面模型。

2.2 叶面积计算结果与分析

为了评估实验结果,本文对比了目前常见的叶面积测定方法。分别使用叶形纸称量法^[30-31]、扫描叶片法^[32]测定了 3 株葡萄的叶片面积并对比测定结果。

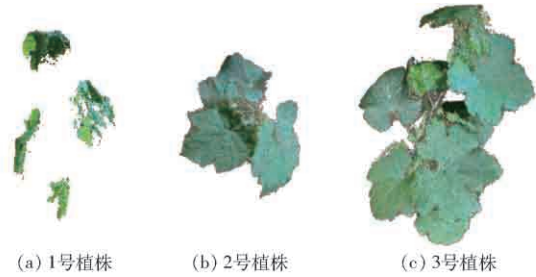


图 3 葡萄叶片提取结果

Fig. 3 Extraction results of plant point clouds

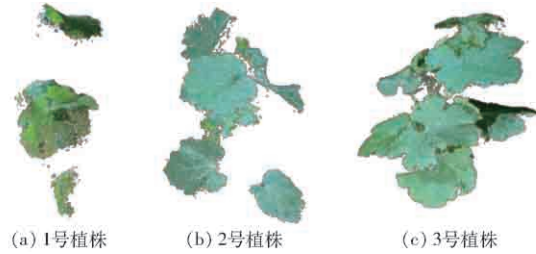


图 4 植株点云去噪结果

Fig. 4 Denoising results of plant point cloud

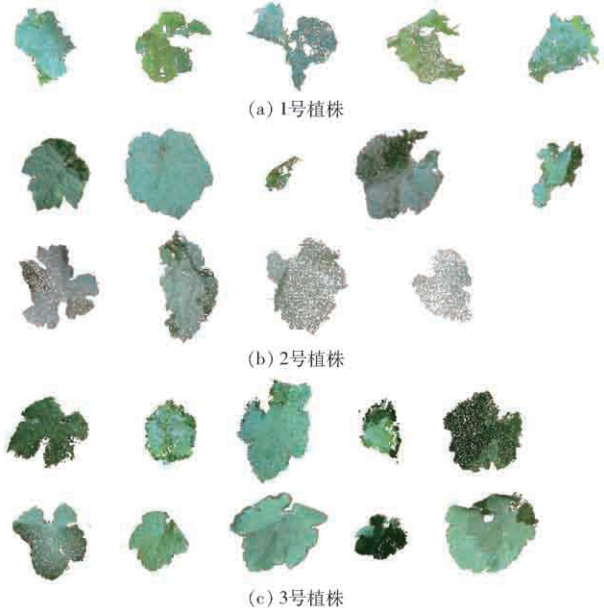


图 5 叶片点云分割结果

Fig. 5 Results of leaf point cloud segmentation



图 6 叶片表面重建结果

Fig. 6 Result of leaf surface reconstruction

在使用叶形纸称量法进行测量时,选用标准 A4 纸,用分析天平准确称量后,得出 A4 纸的面积质量比。用铅笔在纸上准确勾勒出每片葡萄叶片的形状后剪出并称量,经过换算得到了叶片面积。

在使用扫描叶片法进行测量时,采摘叶片后将

叶片平铺放置于打印机的扫描面板上,使用的打印机型号为 Brother MFC-7860DN Printer,二值化处理扫描图像后,统计得出每株葡萄的叶片面积值。

将上述两种方法得到的结果与本文方法得出的结果进行比较,见表 1。

表 1 叶片面积计算结果

Tab. 1 Calculation results of leaf area cm²

植株序号	叶片编号	扫描法	称量法	三维重建法
1	1	63.067 4	58.808 5	64.975 1
	2	47.744 6	43.649 4	46.495 5
	3	37.803 9	32.618 5	42.090 1
	4	25.796 2	24.545 2	23.703 9
	5	9.614 7	9.690 4	10.661 2
2	1	24.966 2	21.509 4	25.995 0
	2	36.058 4	32.193 5	32.487 3
	3	13.326 9	10.662 3	14.281 7
	4	19.859 5	17.143 8	20.855 5
	5	30.434 9	27.051 8	32.842 2
	6	42.238 2	38.336 7	42.051 5
	7	1.966 2	1.248 3	1.597 6
	8	23.841 5	19.619 6	24.215 5
	9	34.410 7	29.558 7	28.744 4
3	1	34.021 7	27.921 2	29.750 0
	2	35.363 0	29.784 2	37.776 0
	3	31.824 3	23.856 8	30.149 5
	4	18.012 2	14.194 0	18.569 0
	5	22.082 3	17.702 0	21.829 0
	6	30.410 0	24.655 0	29.987 1
	7	7.567 7	5.337 5	7.510 6
	8	36.853 0	29.898 1	32.402 9
	9	4.522 6	2.571 3	4.164 1
	10	20.940 7	11.592 3	20.035 9

通过对比计算结果可知,本文方法的计算结果贴近其他两种常见的叶面积测定方法。相比这两种通过直接收割叶片测定面积的方法,本文方法没有破坏性。1、2、3 号植株的叶片重叠情况不等,但就处理结果来看,本文方法具有一定的稳健性。1、2、3 号植株的叶片面积大小不一,面积最小的叶片仅有 1 cm²左右,但结果表明,本文方法的计算结果与其他两种方法对比的误差仍然很小。使用其计算结果与使用扫描法测定的面积相比,1 号植株的平均误差为 1.67 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 6.39%;2 号植株的平均误差为 1.16 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 4.41%;3 号植株的平均误差为 0.79 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 3.21%。3 次重复实验结果平均误差为 1.21 cm²(平均百分比 4.67%);与叶形纸称量法测定值相比,1 号植株的平均误差为 1.58 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 4.51%;2 号植株的平均误差为

1.66 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 8.96%;3 号植株的平均误差为 1.00 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 4.67%。3 次重复实验结果平均误差为 1.41 cm²(平均百分比 6.05%)。误差分析如表 2 所示。

表 2 叶片面积误差分析

Tab. 2 Error analysis cm²

植株序号	叶片编号	相比扫描法误差	相比称量法误差
1	1	1.65	3.56
	2	2.04	0.80
	3	1.97	2.32
	4	1.25	0.85
	5	1.45	0.40
平均值		1.67	1.58
2	1	0.70	0.33
	2	0.46	4.03
	3	1.14	0.19
	4	0.54	0.46
	5	1.71	0.69
	6	2.74	2.56
	7	0.01	0.36
	8	2.06	1.69
	9	1.06	4.61
	平均值	1.16	1.66
3	1	1.87	2.40
	2	0.75	1.67
	3	0.75	0.93
	4	0.28	0.83
	5	0.28	0.53
	6	0.56	0.98
	7	0.11	0.17
	8	2.81	1.64
	9	0.35	0.00
	10	0.11	0.80
平均值		0.79	1.00

目前在田间无损测定植物的叶面积主要采用手持设备获取单一图像并对图像处理的方法^[31-33]。在本文中,使用图像处理法估测 3 株植株的叶面积以作对比。使用 1.3 节中同样的手机采集每株葡萄的图像,在采集过程中放置面积为 25 cm²的黑色方格纸作为参照标志。首先使用 Matlab 中 Image Labeler 工具对黑色方格纸进行标记,并使用 Canny 算子提取出黑色方格纸的轮廓,腐蚀填充后统计像素数。使用阈值分割法对叶片进行分割,选取 L*a*b 颜色空间作为特征,设置通道 1 的阈值范围为[0.555,0.647],通道 2 的阈值范围为[0.431,0.497],通道 3 的阈值范围为[0.503,0.497 4],使用 Canny 算子提取叶片的轮廓,腐蚀填充后得到叶片的像素数,换算得出每株叶片的估测值。

使用单一图像法处理得到的植株整株叶面积之和估测值与本文方法及叶形纸称量法、扫描法的结果对比如表 3 所示。结果表明,在获取整株植株的叶片面积时,使用单一图像处理方法估测的叶面积结果与叶形纸称量法相比,3 次重复实验的平均误差为 53.05 cm²;与扫描法相比,3 次重复实验的平均误差为 80.10 cm²。使用三维重建法估测的结果与叶形纸称量法相比,3 次重复实验的平均误差为 37.93 cm²;与扫描法相比,3 次重复实验的平均误差为 5.07 cm²。一方面来看,误差来源可能是在实际情况中大多数叶片是弯曲的、不平整的。基于图像处理的方法可能很难解决不在同一平面内的扭曲叶面的面积估测问题,然而这为基于三维点云的叶面积估测方法带来了机遇。从另一方面来看,在处理从单一视角获取的植株图像时,基于 Canny 算子提取叶片区域的方法无法很好地解决叶片间的重叠问题,在处理重叠的叶片时,会被误认为这是一个联通的区域,而非分离的区域,如图 7 所示。这也是偏差较大的原因之一。

表 3 与图像法结果对比

Tab.3 Comparison results between proposed methods and image processing				cm ²
植株序号	图像法	三维重建法	扫描法	称量法
1	59.71	186.48	184.03	169.31
2	156.49	228.61	227.10	197.32
3	196.25	252.85	241.60	187.51

结果表明,针对整个植株的单个叶片面积测定问题,本文无损精确测定叶片面积的方法是可靠的。相比处理单一图像来估测叶面积的方法,本文方法更能处理叶片重叠、叶片卷曲等现象导致计算有误的问题。相比其他方法重建植株的三维点云模型的

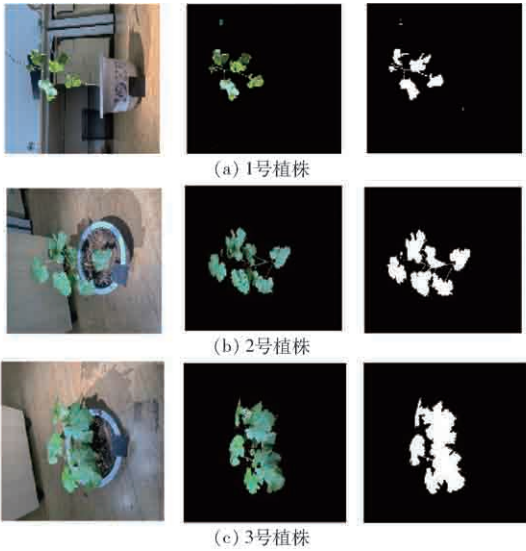


图 7 叶片区域提取过程

Fig.7 Leaf area extraction based on image processing

方法,本文方法不需要搭载复杂的系统,也不需要对接相机进行校正,操作更加简便且成本低廉。

3 结论

(1)使用运动恢复结构算法处理智能手机所获取的植物图像,对植物进行三维点云模型重建,提出了一种叶片点云分割、表面重建方法及叶片面积无损估测的方法。该方法适用于日常图像获取平台,成本低廉,操作简单,且获取的点云数据还原度较高。

(2)相比常规测定叶片面积的方法,本文方法的计算结果与扫描叶片法测定值相比平均误差为 1.21 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 4.67%;与叶形纸称量法测定值相比平均误差为 1.41 cm²,误差占叶片面积的平均百分比为 6.05%。表明该方法具有较高的可靠性。

参 考 文 献

[1] SCHUNK C R, EBERIUS M. Plant mutation breeding and biotechnology[M]. CABI Publishing, 2012.

[2] 周济, FRANCOIS Tardieu, TONY Pridmore, 等. 植物表型组学:发展、现状与挑战[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(4): 580-588.

ZHOU Ji, FRANCOIS Tardieu, TONY Pridmore, et al. Plant phenomics: history, present status and challenges[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(4): 580-588. (in Chinese)

[3] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 227-235, 282.

GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. Research and application status and development countermeasures of agricultural internet of things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 227-235, 282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140735&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035. (in Chinese)

[4] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.

LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)

[5] RAHMAN H, RAMANATHAN V, JAGADEESHSELVAM N, et al. Phenomics: technologies and applications in plant and agriculture[M]. PlantOmics: The Omics of Plant Science, 2015.

- [6] 郭文川,周超超,韩文霆. 基于 Android 手机的植物叶片面积快速无损测量系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(1): 275 – 280.
GUO Wenchuan, ZHOU Chaochao, HAN Wenting. Rapid and non-destructive measurement system for plant leaf area based on Android mobile phone[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 275 – 280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140142&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.042. (in Chinese)
- [7] GONG A, WU X, QIU Z, et al. A handheld device for leaf area measurement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98:74 – 80.
- [8] SPALDING E P. Computer vision as a tool to study plant development[J]. Methods in Molecular Biology, 2009, 553:317 – 326.
- [9] MINERVINI M, SCHARR H, TSAFTARIS S A. Image analysis: the new bottleneck in plant phenotyping[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2015, 32(4):126 – 131.
- [10] 高宇,高军萍,李寒,等. 植物表型监测技术研究进展及发展对策[J]. 江苏农业科学,2017, 45(11):13 – 18.
GAO Yu, GAO Junping, LI Han, et al. Advances in phenotypic monitoring technology of plants and development strategies[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(11):13 – 18. (in Chinese)
- [11] MINERVINI M, ABDELSAMEA M M, TSAFTARIS S A. Image-based plant phenotyping with incremental learning and active contours[J]. Ecological Informatics, 2014, 23:35 – 48.
- [12] 刘刚,司永胜,冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):38 – 46,19.
LIU Gang, SI Yongsheng, FENG Juan. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):38 – 46, 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.007. (in Chinese)
- [13] PAULUS S, DUPUIS J, MAHLEIN A K, et al. Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping[J]. BMC Bioinformatics, 2013, 14(1):238.
- [14] PAULUS S, BEHMANN J, MAHLEIN A K, et al. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(2):3001 – 3018.
- [15] WAHABZADA M, PAULUS S, KERSTING K, et al. Automated interpretation of 3D laserscanned point clouds for plant organ segmentation[J]. BMC Bioinformatics, 2015, 16(1):248.
- [16] 张伟洁,刘刚,郭彩玲,等. 基于三维点云的苹果树叶片三维重建研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):103 – 109.
ZHANG Weijie, LIU Gang, GUO Cailing, et al. Apple tree leaf three-dimensional reconstruction based on point cloud[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):103 – 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.017. (in Chinese)
- [17] 郭焱,史同鑫,吴劼,等. 烟草植株静态虚拟模型的研究[J]. 中国烟草学报, 2012,18(5):35 – 39.
GUO Yan, SHI Tongxin, WU Jie, et al. The development of static virtual tobacco model basing on three dimensional scanning methodology[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(5):35 – 39. (in Chinese)
- [18] 方慧,胡令潮,何任涛,等. 植物三维信息采集方法研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3):142 – 147.
FANG Hui, HU Lingchao, HE Rentao, et al. Three dimensional information collection method of plants[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3):142 – 147. (in Chinese)
- [19] 沈跃,潘成凯,刘慧,等. 基于改进 SIFT – ICP 算法的 Kinect 植株点云配准方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):188 – 194.
SHEN Yue, PAN Chengkai, LIU Hui, et al. Method of plant point cloud registration based on Kinect of improved SIFT – ICP[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):188 – 194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171221&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.021. (in Chinese)
- [20] 劳彩莲,杨瀚,李鹏,等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):229 – 235.
LAO Cailian, YANG Han, LI Peng, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):229 – 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190724&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.024. (in Chinese)
- [21] 何东健,邵小宁,王丹,等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):336 – 341.
HE Dongjian, SHAO Xiaoning, WANG Dan, et al. Denoising method of 3D point cloud data of plants obtained by Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):336 – 341. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160145&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.045. (in Chinese)
- [22] LATI R N, FILIN S, EIZENBERG H. Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98:260 – 271.
- [23] WESTOBY M J, BRASINGTON J, GLASSER N F, et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications[J]. Geomorphology, 2012, 17:300 – 314.

- neck-mounted accelerometers[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2019, 211: 9 – 16.
- [18] YUKI T S, YASUNARI Y, EIGHT M D, et al. Development of the automatic analytical method of the feeding time chewing behaviour of the cow in the sound monitoring using the uniaxial acceleration sensor[J]. *Animal Behaviour and Management*, 2009, 45(1): 38.
- [19] 菅悠紀, 山本匠, 越川志津, 等. 奶牛颈戴三轴加速度传感器的行为分析[J]. 日本大型动物诊所杂志, 2014, 5(2): 130 – 131. KANYOU, YAMAMOTO M, YUECHUAN Z, et al. Behavior analysis of the milk cow using the cervical wearing triaxiality acceleration sensor[J]. *Japanese Journal of Large Animal Clinics*, 2014, 5(2): 130 – 131. (in Japanese)
- [20] 佐藤岳, 菅悠紀, 越川志津, 等. 奶牛颈戴三轴加速度传感器检测到的反刍行为的农舍比较[J]. 日本大型动物诊所杂志, 2015, 6(2): 94 – 95. SATOYUE, KANYOU, YUECHUAN Z, et al. Comparison between the farmhouse of the rumination behavior detected by the cervical wearing triaxiality acceleration sensor in the milk cow[J]. *Japanese Journal of Large Animal Clinics*, 2015, 6(2): 94 – 95. (in Japanese)
- [21] HASSEN F, NOUREDDINE M, LISSAN A, et al. Posture and body acceleration tracking by inertial and magnetic sensing: application in behavioural analysis of free-ranging animals[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2011, 6(1): 94 – 104.
- [22] 何灿隆, 沈明霞, 刘龙申, 等. 基于加速度传感器的肉鸡步态检测方法研究与实现[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(2): 365 – 372. HE Canlong, SHEN Mingxia, LIU Longshen, et al. Research and implementation of gait detection method for broilers based on acceleration sensor[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(2): 365 – 372. (in Chinese)
- [23] USHERWOOD J R, HEDRICK T L, MCGOWAN C P, et al. Dynamic pressure maps for wings and tails of pigeons in slow, flapping flight, and their energetic implications[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(2): 355 – 369.
- [24] USHERWOOD J R, STAVROU M, LOWE J C, et al. Flying in a flock comes at a cost in pigeons[J]. *Nature*, 2011, 474(7352): 494 – 497.
- [25] 易雁飞. 基于 K-means 聚类的数据分析[J]. *现代制造技术与装备*, 2017(4): 8 – 9. YI Yanfei. Data analysis based on K-means clustering[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2017(4): 8 – 9. (in Chinese)
- [26] WANG Rui, XU Hui, MA Jian, et al. CFD analysis of airflow distribution in greenhouse with pad and fan cooling system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 250 – 255, 397.
-

(上接第 246 页)

- [24] SANTOS T T, KOENIGKAN L V, BARBEDO J G A, et al. 3D plant modeling: localization, mapping and segmentation for plant phenotyping using a single hand-held camera[M]. *Computer Vision-ECCV 2014 Workshops*. Springer International Publishing, 2014.
- [25] JAY S, RABATEL G, HADOUX X, et al. In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using structure from motion[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 110: 70 – 77.
- [26] WANG C, LIU L. Feature matching using quasi-conformal maps[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(5): 644 – 657.
- [27] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Commun. ACM*, 1981, 24(6): 381 – 395.
- [28] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [29] BERNARDINI F, MITTLEMAN J, RUSHMEIER H, et al. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4): 349 – 359.
- [30] 肖家欣, 刘志文, 罗充. 植物生理学实验[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 2010.
- [31] 潘铜华, 王云龙, 杨俊伟, 等. 蔬菜幼苗叶面积快速测定方法筛选与优化[J]. *中国蔬菜*, 2018(8): 64 – 69. PAN Tonghua, WANG Yunlong, YANG Junwei, et al. Screening and optimization of rapid measurement method for leaf area of vegetable seedlings[J]. *China Vegetables*, 2018(8): 64 – 69. (in Chinese)
- [32] 龚爱平. 基于嵌入式机器视觉的信息采集与处理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. GONG Aiping. Study of the information acquisition and processing technology based on embedded machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [33] 于东玉, 冯天祥, 李奕昕, 等. 基于植物图像的活体叶片面积测量方法研究与实现[J]. *智能计算机与应用*, 2019, 9(4): 173 – 176. YU Dongyu, FENG Tianxiang, LI Yixin, et al. Research and implementation of living leaf area measurement based on plant image[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2019, 9(4): 173 – 176. (in Chinese)