doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.022

基于光学相机的植物表型测量系统与时序生长模型研究

张慧春[1]　王国苏[1]　边黎明[2,3]　郑加强[1]　周宏平[1]

(1.南京林业大学机械电子工程学院,南京 210037;2.南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037;
3.南京林业大学林学院,南京 210037)

摘要:为提高形态表型检测速率,满足形态表型测量的标准化需求,以拟南芥为例,提出一种测量植物三维形态特征的方法,并建立植物时序生长方程和可视化模型,构建了一套经济实用、面向拟南芥生长过程的形态表型测量机器视觉系统。通过光学相机采集拟南芥植株的二维图像序列,利用运动中恢复结构算法生成三维点云;设计一种彩色标板,基于彩色标板的坐标系标准化方法,提取拟南芥植株的点云并标准化坐标系。与传统人工接触式测量值相比,该系统交互测量的拟南芥叶片宽度、长度、主茎长度、叶片面积、叶片间夹角的平均相对误差分别为 9.83%、10.10%、1.07%、4.09%和 4.37%。利用该系统采集哥伦比亚野生型拟南芥生命周期内的形态表型信息,拟合其数学生长模型,并使用 L-studio 软件,将时序生长模型可视化表达。结果表明,植物固定、传感器移动的平台结构解决了传统传感器固定、植物移动方式导致的植物抖动从而影响三维重建效果的问题,可快速、准确、可靠地提取植物表型信息。基于彩色标板的点云坐标系标准化方法在每个单位时间都能够对拟南芥植物对象进行参数提取,与传统的人工接触式测量方法相比,效率高、速度快,可满足拟南芥的形态表型分析需要。

关键词:拟南芥;表型;光学相机;可视化模型;运动中恢复结构;时序生长

中图分类号:S24;TP391.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)10-0197-11

Visible Camera-based 3D Phenotype Measurement System and Time-series Visual Growth Model of Plant

ZHANG Huichun[1]　WANG Guosu[1]　BIAN Liming[2,3]　ZHENG Jiaqiang[1]　ZHOU Hongping[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*
2. *Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*
3. *College of Forestry*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: The morphological traits are important to investigate the state of plant. Measuring the morphological traits periodically during plant growing and fitting the growth model can be helpful to monitor the state and get dynamic growth rule of the plant. And growth model's visualization can be more directly to show the dynamic changes and predict the plant growth tendency. To speed up and promote the normalization of the measurement of morphological phenotypes, using *Arabidopsis thaliana* for example, a low-cost machine vision system was designed which can be used to measure the morphological phenotypes of *Arabidopsis thaliana* during its growth process. With the growth data getting from the system, the plant growth equations and visualization model can be built. A platform was set which consisted of two main parts, fixed part for loading plant and moving part for carrying visible camera, to make sure that the plant would not shake so that can get clearer image sequences. Structure from motion (SfM) was used to get the 3D point cloud from the image sequence. Because of the weakness of SfM, which made the coordinate system generated each time different, a preprocessing algorithm to point cloud based on color panels board was designed to standardize every plant 3D point cloud model's coordinate system as one. Under the stage for loading plant of the platform's fixed part, a color panels board was set, which was a black board on which two red panels consisted of two line-style and a rectangle-style and one blue panel, and would be transformed to a part of the 3D point cloud. After filtering procedures, the area-of-interest of

收稿日期:2019-04-02　修回日期:2019-05-07

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK20161523)、福建省林木种苗科技攻关六期项目(20192021)、江苏省六大人才高峰项目(NY-058)、江苏省青蓝工程项目(苏教 201842)、江苏省 333 工程项目(苏人 20186)和国家留学基金委公派项目(201808320043)

作者简介:张慧春(1978—),女,教授,博士,主要从事农林信息技术与装备和农药精确使用技术研究,E-mail:njzhanghc@hotmail.com

Arabidopsis thaliana was extracted from the original point cloud. To test the reliability of the color panels board, a 3mm × 3mm blue square was fixed on the platform for a repeat trails. Firstly, three kinds of board were used, on which red panels were only line-style, only rectangle-style and both of them respectively, for three testing groups. Each testing group had 30 3D point cloud models from the same 10 plants and each plant was collected from three different camera perspectives. Secondly, the method to standardize every 3D point cloud model's coordinate system was used. Then the centroid coordinate of 3mm × 3mm blue square's point clouds on each model was got, and the Euclidean distance between the centroids in each testing group was calculated. Throughout the value of contrast test, the mean absolute percentage error of leaf width, leaf length, main stem's length, leaf area and angle between leaves were 9.83%, 10.10%, 1.07%, 4.09% and 4.37%, respectively. A time-series morphological phenotyping data of three *Arabidopsis thaliana* samples were collected and used to fit a mathematical model. After that, the model was visualized on L-studio with L-system.

Key words: *Arabidopsis thaliana*; phenotypes; visible camera; visual model; structure from motion; time series growth

0 引言

植物表型是指能够反映植物结构和组成的,或能反映植物生长发育过程和结果的,由一个基因型与一类环境互作产生的部分或全部可辨识的植物物理、生理和生化特征及性状[1]。实际使用的表型往往是指植物生长发育的某一具体性状,它包括基因产物(如蛋白质和酶)、各种形态特征和生理特性。植物的形态表型参数是植物表型中的关键组成部分[2-3],例如,植物叶片是植物进行光合作用从而制造氧气、合成营养物质的主要器官,是植物进行蒸腾作用从而提供根从外界吸收和运输水分动力的主要途径,叶片的面积、角度、空间分布会影响光截获、表面蒸发、光合作用以及生长量[4-6];植物根茎的粗细及生长速度也反映出植物的生长状态。持续采集植物生长过程中的形态表型参数,构建其三维形态结构随时间变化的时序生长模型,有助于观察植物品种间、生长阶段间、植物与环境间的作用关系,指导受时间和条件限制的试验。同时,将时序生长模型进行可视化仿真,可以更真实地描述植物的生长过程,不仅在科研规律探索、生产力评价、产量预测中发挥作用,在自然景观设计、虚拟教学等领域也将产生较大的意义。

传统表型检测由人工进行,受人为因素影响较大,由于复杂的空间形态结构,植物的叶面积、茎杆夹角等参数的测量都需要破坏式、接触式测量,导致表型信息不连续、不稳定,因此植物表型检测平台成为植物表型领域的研究热点。在植物的形态表型测量中,从单角度(如植物顶部或侧面)测量形态表型信息简单、便捷[7-8],但存在遮挡、单一角度投影值不准确等问题,因此采取使植物旋转从而获取不同角度信息的方式,经过算法处理提取相关的表型参数[9-10],但植物旋转、传感器固定的方式会导致植物尤其是叶片幼小、茎秆细长植物的器官抖动,影响测量效果。用于植物形态表型信息采集的传感器包括激光传感器[11]、深度相机[12]、光学相机[13]、雷达等,其精度、成本各有优劣,相比较而言,光学相机的成本低廉、使用方便、成像可靠。

拟南芥作为模式植物,其在遗传学、分子生物学及发育生物学各方面已被人们广泛、深入地认识,对于表型研究具有无可取代的便利条件。本文以拟南芥作为研究对象,设计一套经济实用、能够对拟南芥生长过程的表型三维参数进行非破坏式测量的检测系统,利用该系统采集的拟南芥形态表型参数拟合生长数学方程,使用 L-studio 软件建立基于 L-system 的拟南芥时序生长可视化模型。

1 形态表型参数采集系统

1.1 植物点云获取平台

植物点云获取平台通过标准化的硬件结构及稳定的处理工具获得植株多个生长时期的三维点云信息。在实际操作中,人为的搬移、旋转都容易造成植株茎秆和叶片的抖动,影响三维点云的获取[14]。为了获取较为可靠的点云数据,应尽可能使目标植株保持静止,以相机运动获取多角度信息[15]。本文采用运动中恢复结构(Structure from motion,SfM)方法获取植物三维信息,使相机产生运动从而拍摄多幅图像,通过对该图像序列中的目标进行数学分析,计算相机的三维运动参数,由此得到物体的三维空间信息[16]。

植物点云获取平台主要分为两部分:硬件结构(图像获取)平台和点云生成软件。植物点云获取平台的硬件结构如图 1 所示,其中,植株承载平台用于摆放植株及彩色标板;相机搭载平台用于放置光学相机和电机驱动系统,实现相机相对拟南芥植株的圆周运动,从而实现在多个角度对植株进行拍摄;

图像采集系统用于实现相机运动过程的自动拍摄、图像保存等功能；光源及背景模块包括照明灯组以及覆盖平台各面的黑色绒布，用于确保拍摄环境的稳定可靠，尽可能降低噪声干扰。

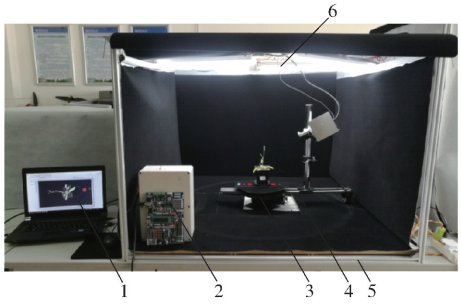


图 1　植物点云获取平台实物图

Fig. 1　Diagram of platform for acquiring 3D point cloud of plant

1. 图像采集系统　2. 电机驱动系统　3. 植株承载平台　4. 相机搭载平台　5. 平台框架　6. 照明灯组

使用硬件结构（图像获取）平台获取拟南芥二维图像序列。首先将植株摆放在植株承载平台正中，然后放下绒布，减少外界环境影响；启动图像采集系统及电机驱动系统，令相机围绕植株旋转并等时间间隔采集图像。使用点云生成软件 Visual SfM[17-18] 对图像序列进行处理，得到原始点云，使用点云库 PCL1.7 在 Visual Studio 2015 平台上开发相应算法程序进行数据处理，所有程序在 Windows 10 系统环境下运行。

1.2　点云坐标系标准化算法

为确保对拟南芥生长过程进行持续观测、各个时期点云的尺度保持一致且方便算法统一提取[19]，本文提出一种拟南芥点云坐标系标准化方法，即基于彩色标板的点云坐标系转换及预处理。彩色标板使用绒布为材料，目的是减少光的反射；彩色标板整体呈矩形，覆盖黑色绒布；以彩色标板中心对称分布有两部分红色标板，每部分红色标板都由两段平行的红色线段和一红色方块组成。

标准化坐标系如图 2 所示。标准化坐标系的原点为红色标板的中心对称点；将标准化坐标系的 X 轴定义在红色标板左右两部分的重心连线上，方向为从远离蓝色标板的重心指向靠近蓝色标板的重心，单位化后即作为标准化坐标系的 X 轴正向单位向量；将标准化坐标系的 Z 轴正向单位向量定义为垂直彩色标板平面，并指向植株的单位法向量；基于右手法则，取同时垂直于 X 轴和 Z 轴的方向为 Y 轴方向。

首先，从原始点云中提取出蓝色标板点云、红色线段点云及红色方块点云。使用颜色滤波过滤出相应颜色阈值范围内的点云并分别存储，过滤效果如

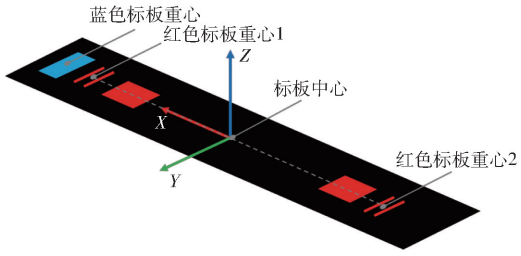


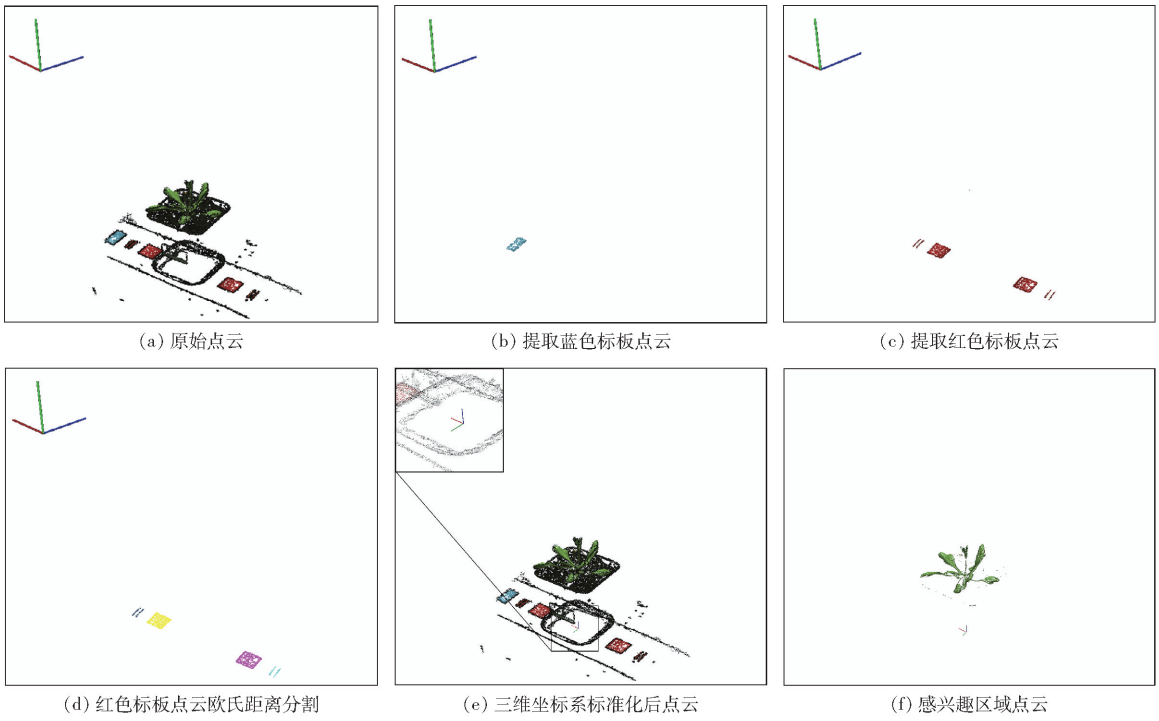
图 2　标准化坐标系

Fig. 2　Normalized coordinate system

图 3b、3c 所示；使用欧氏距离分割法将红色标板点云分割成中心对称的两部分，分别对其进行进一步欧氏距离分割，得到各自的红色线段点云及红色方块点云，如图 3d 所示。然后，标记两红色线段点云。分别计算蓝色标板点云和两红色线段点云的重心坐标（所述点云重心即点云中所有点的空间坐标的平均值），以与蓝色标板点云重心的距离作为依据，将重心距离较近的红色线段点云标记为点云 1，重心距离较远的红色线段点云标记为点云 2。计算出标准化坐标系各单位坐标轴向量在原始坐标系中的向量坐标。X 轴的单位向量为点云 2 重心指向点云 1 重心方向；Z 轴的单位向量为整个红色标板点云的法向向量，方向向上；Y 轴的单位向量遵循右手定则，同时垂直于 X、Z 轴单位向量。在获取了标准化坐标系各坐标轴单位向量在原始坐标系中的向量坐标后，还需要对点云进行尺度缩放。将两红色线段标板实际的重心距离与两红色线段标板点云的重心距离相除，得出比例因子。对原始点云的所有点坐标进行矩阵计算，得到转换后标准坐标系下的点云，如图 3e 所示。最后，从转换后坐标系下的点云中提取出感兴趣区域点云，即拟南芥植株点云。由于此时点云处于标准化坐标系中，因此可以通过坐标范围初步提取培养皿表面土壤及拟南芥植株部分点云。因为土壤颜色与植株颜色阈值区别较大，因此可以进一步通过颜色阈值提取出感兴趣区域点云，如图 3f 所示。

1.3　拟南芥形态表型参数提取

为确保提取结果的准确性，考虑到拟南芥生长的持续性，本系统选择非接触交互式测量方法，提取拟南芥叶片长宽、面积、主茎长度及叶片间夹角。对于叶片长宽及主茎长度，通过可视化点云界面连续选点，计算连续点间的直线距离之和近似为相应的长度数据；对于叶片面积，使用 Geomagic Studio 12 软件对叶片点云进行曲面重建，并计算叶片曲面的面积；对于叶片间夹角，采用计算向量间夹角的方法，将拟南芥叶片的叶柄视作向量位置，方向默认为从叶片生发点指向叶片顶端。因此选择向量的两端点时，应先选择靠近生发点的端点，然后选择靠近叶



(a) 原始点云 (b) 提取蓝色标板点云 (c) 提取红色标板点云

(d) 红色标板点云欧氏距离分割 (e) 三维坐标系标准化后点云 (f) 感兴趣区域点云

图 3 提取彩色标板点云实例

Fig. 3 Examples of extracting point cloud of color panels

片顶端的端点,换言之,向量的方向由植物重心指向外部。

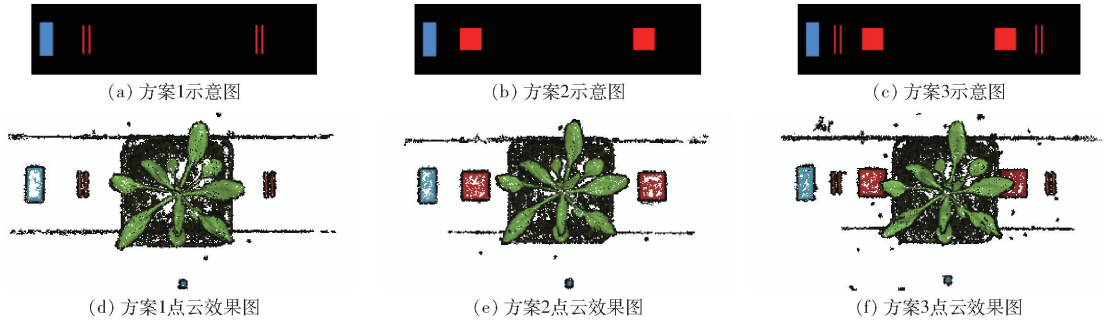
2 试验与评价

2.1 标准化坐标系的稳定性

在使用基于彩色标板的点云预处理算法进行坐标系转换时,由于 SfM 算法对梯度变化较大,即对纹理较为复杂、清晰的特征点更为敏感,因此对于一整块的单色标板而言,其边界部分特征识别率较高,中间的平面特征识别率较低,从而所生成的点云中间部分会随机出现一些空洞,造成点云分布不均匀。结合预处理算法的步骤,若标板内部点云有明显的分布不均,可能会影响标准坐标系的原点位置。因此,需要针对此情况对坐标系转换的稳定性进行评估。

试验方案如下:首先,以单色线段、单色平面两种特征作为对比,设置两组不同的彩色标板,两种标板都以黑色绒布作为底板,一端设置有蓝色标板作为方向识别;区别在于,方案 1 在两端分别设置两段红色线段,如图 4a 所示,图 4d 为对应的点云;方案 2 在两端分别设置一红色矩形,如图 4b 所示,图 4e 为对应的点云。其次,在植株承载平台上固定一蓝色小方块(固定位置与彩色标板不相关),作为空间固定点,其规格为 3 mm × 3 mm,如图 5 所示;获取不同方案下多次识别的空间固定点云重心坐标,计算每个重心坐标与所有重心坐标平均值的接近程度,从而评价当前方案下系统坐标系生成的稳定性。

本文共设置两轮试验,每轮试验放置不同的彩色标板方案,对同一批拟南芥(共 10 株)依次采集 360°范围内的图像信息。测量系统结构如图 6 所示,依次调节相机高度至 A、B、C 3 个位置,在每个位置处调节相机角度,使得彩色标板完全位于相机视野范围内,从而保证采集到较为完整的信息,减少因枝叶遮挡导致的信息缺失。放置拟南芥植株,电



(a) 方案1示意图 (b) 方案2示意图 (c) 方案3示意图

(d) 方案1点云效果图 (e) 方案2点云效果图 (f) 方案3点云效果图

图 4 待测试的标板方案

Fig. 4 Color panels to be considered

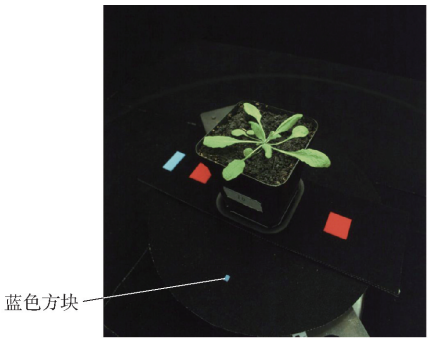


图 5　空间固定点设置

Fig. 5　Set of fixed point

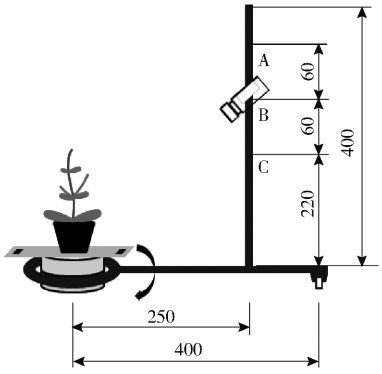


图 6　测量系统主要结构示意图

Fig. 6　Diagram of main structure

机通电驱动相机围绕植株旋转，旋转过程中等时间间隔采集 33 幅图像（考虑相机基本呈匀速转动，为减少因电机启动、停止造成相机搭载平台的抖动而影响拍摄效果，根据实际效果调节相机搭载平台转速为 0.01 r/s，相机获取图像时间间隔为 3 s）；对图像序列进行三维重建获取原始点云，并使用预处理算法获得坐标系转换后的点云；由此，对于每种特征彩色标板各获得 3 个角度共 30 组拟南芥点云数据。

最终输出固定蓝色方块重心在转换坐标系中的坐标值 $B_{i,j}$，其中 i 为试验轮数（$i=1,2$），j 为每轮中采集的组数（$j=1,2,\cdots,30$）。计算每轮试验中各重心坐标 $B_{i,j}$ 相对其整体中心坐标 C_i 的欧氏距离 $E_{i,j}$。表 1 为方案 1、2 中多次测量空间固定点点云重心坐标 $B_{i,j}$ 相对整体中心坐标 C_i 的欧氏距离 $E_{i,j}$ 评价结果。计算方案 1 中 $E_{1,j}$ 的方差为 0.056 mm^2，方案 2 中 $E_{2,j}$ 的方差为 0.081 mm^2，相比较而言，方案 1 的坐标系稳定性优于方案 2；同时也能够发现，方案 1 在试验中坐标点偏移距离范围为 0.082 ~ 1.029 mm，方案 2 为 0.224 ~ 1.440 mm。此结果还未排除空间蓝色固定方块点云内部因空洞导致的重心坐标偏移，因此精度在可接受范围内。

为进一步提升系统坐标转换的稳定性，本文最终综合方案 1、2 的特点，设计方案 3 作为彩色标板。考虑到方案 1 即线段特征对生成的坐标系具有稳定性的优势，方案 3 中仅使用标板上两线段作为生成坐标系的参考，两红色方块只作为辅助特征，不参与坐标系建立。方案 3 示意图、点云效果图如图 4c、4f 所示。

表 1　各方案中重心坐标间欧氏距离评价

Tab. 1　Evaluation of Euclidean distance

方案	最小值/mm	最大值/mm	平均值/mm	方差/mm^2
1	0.082	1.029	0.505	0.056
2	0.224	1.440	0.664	0.081
3	0.080	1.067	0.443	0.052

2.2　形态表型参数的准确性

为覆盖拟南芥各生长阶段，考虑各参数的生长速度不同，对苗期、抽薹期以及成熟期（分别对应第 12、20、32 天）的拟南芥共计 12 株进行测量对比，采集叶片宽度、叶片长度、主茎长度、叶夹角和叶片面积等表型数据。对常用的传统测量方式与本系统测量方式获得的形态表型参数数值进行一致性分析，对于拟南芥的叶片长度、叶片宽度、主茎长度参数，使用刻度尺对样本拟南芥进行人工接触式测量；对于拟南芥的叶片面积参数，使用投影拍摄法拍摄样本拟南芥叶片及单位标板（面积为 1 cm^2 的正方形蓝色卡纸）的投影图像，使用 AutoCAD 2017 软件选取叶片轮廓及单位标板轮廓，计算出两者覆盖的面积并相除，结果作为叶片的面积；对于拟南芥的叶夹角参数，由于人工接触式测量（如使用量角器）容易改变拟南芥叶片的空间位置，因此也选择投影拍摄法拍摄拟南芥叶片的投影图像，使用 AutoCAD 2017 软件沿相应的叶柄绘制线段，测量相应线段间的角度；通过测量各参数的均方根误差（Root mean squard error，RMSE）和平均绝对百分比误差（Mean absolute percentage error，MAPE），评估系统的测量精度。

$$R_{\mathrm{M}}=\sqrt{\frac{1}{n'}\sum_{i=1}^{n'}(x_{ai}-x_{mi})^2} \tag{1}$$

$$M_{\mathrm{A}}=\frac{1}{n'}\sum_{i=1}^{n'}\frac{|x_{ai}-x_{mi}|}{x_{ai}}\times 100\% \tag{2}$$

式中　R_{M}——均方根误差

M_{A}——平均绝对百分比误差

x_{ai}——传统法测量值

x_{mi}——系统测量值　　n'——样本数

测量结果如图 7 所示，叶片宽度、叶片长度、主茎长度、叶片面积以及叶夹角的传统测量结果与本系统测量结果的 RMSE 分别为 1.16 mm、2.04 mm、2.94 mm、10.85 mm^2 和 5.06°；MAPE 分别为 9.83%、10.10%、1.07%、4.09% 和 4.37%。根据此

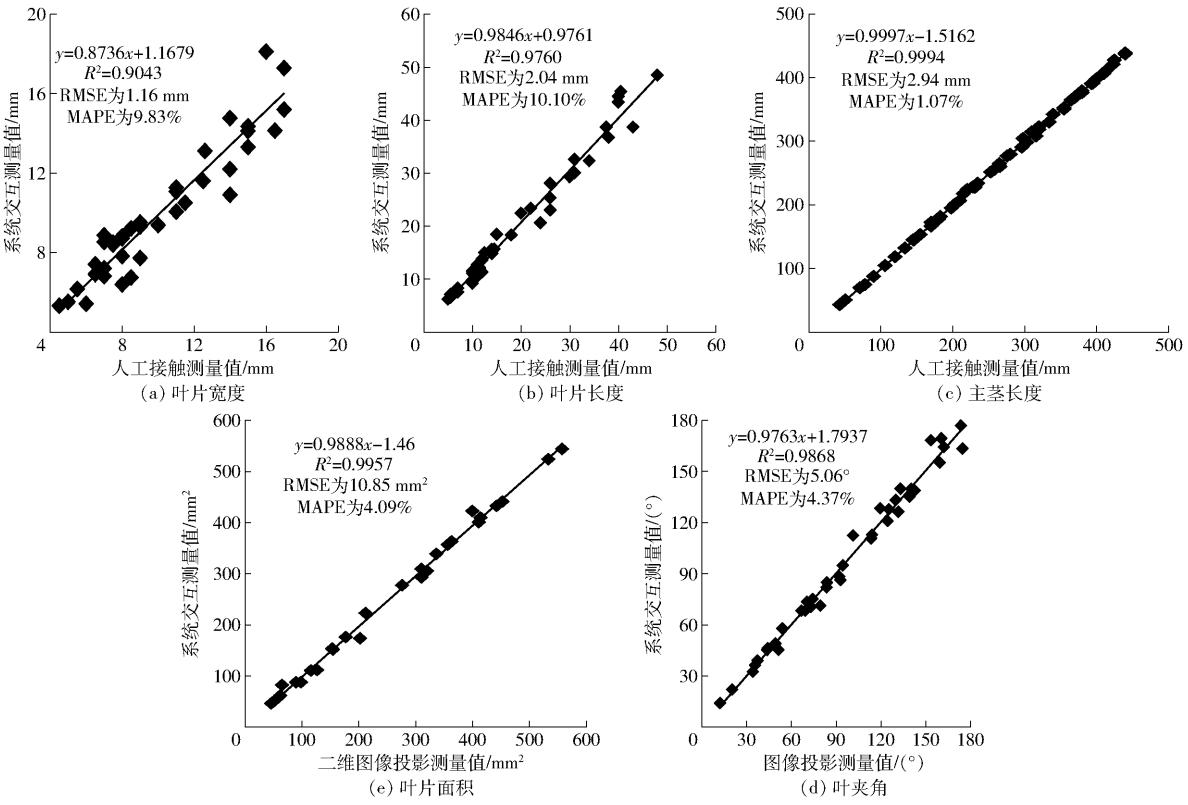


图 7 形态表型参数测量准确性评价

Fig. 7 Accuracy evaluation results of morphological traits measurement

结果分析,对于长度数据(叶片宽度、叶片长度、主茎长度)而言,由于叶片宽度、叶片长度相对主茎长度较小,所以在均方根误差较小的情况下,前两者的平均绝对百分比误差相对偏大;主茎长度、叶片面积以及叶夹角的平均绝对百分比误差都保持在 5% 以下。

3 拟南芥时序生长模型及可视化

在植物生长可视化领域,主要选择 L-system 与 C 语言对植物进行描述,因为其所表达的分形理论非常适合描述植物的拓扑形态。现有研究进行了基于拟南芥的功能结构模型的可视化,是适应抽象模型下拟南芥形态的可视化模拟[20],本研究则主要利用实测的形态数据对应拟合出各器官的生长函数,探索更加贴近植物生长实际情形、更适合批量样本、特殊样本的植物生长模型可视化方法。

3.1 生长试验

以哥伦比亚野生型拟南芥为对象,在温度 28℃、相对湿度 80%、光照强度为 15 444 lx 的人工气候箱(江南仪器厂,RXZ-500B 型)中种植,昼夜时长分别为 16、8 h。此环境条件下拟南芥发育良好,各部分尺寸及生长速度变化明显,有利于试验操作、生长模型构建及验证[5]。

在培养箱中同时培育一批拟南芥作为候选样本(共 20 株),样本进行编号标记以确保在培养箱中的摆放位置不变,每天同一时间按同一次序使用点云获取平台采集样本形态表型参数,保证采样频率的一致性和可靠性。通过对所有候选样本的持续、同步采集及观测,利用其表型参数构造拟南芥在此环境条件下的数学回归模型。植物的主茎及莲座叶生长模型可使用 Logistic 模型进行拟合[21-22],Logistic 模型的表达式为

$$y(t)=\frac{A}{1+be^{-kt}} \tag{3}$$

式中 $y(t)$——模型生长量(叶片面积,mm²;主茎长度,mm)

A——模型最终的尺寸(叶片最终面积,mm²;主茎最终长度,mm)

k——生长速度参数 b——常系数

t——测量日期距离播种日期的时间,d

在获得拟南芥的数学生长模型后,使用基于 C 语言的 L-system 语句(即 L+C 语言)描述出拟南芥在某阶段或全部阶段的生长过程。为了更形象地表现出拟南芥的生长模型可视化效果,语句中的一些描述植物器官的符号应与预先定义的图形结合起来,构成 L+C 语言控制的可视化生长模型,最终基于 L-studio 平台实现拟南芥时序生长模型的可视化[23]。

3.2 基于 L-system 的生长程序设计

首先,基于生长规律的可视化生长模型的“逐

渐生长”效果，决定了生长程序必须使用微分 L－system。微分 L－system 能够将生长模型的数学微分方程映射到植物器官，描述出“逐渐生长”的过程，例如拟南芥叶片的发育、茎秆的伸长等。

其次，为反映拟南芥生长过程“质”的变化，例如先长出莲座叶，然后开始长出主茎，再至成熟期开花，因此在生长程序中应能够控制各器官的发生顺序。在大多数的基于 L-studio 的植物生长模型中，这种“质”的变化被初始定义在程序的公理和产生规则中。

根据拟南芥的生理形态结构，除了使用时间 t 作为产生规则及各器官的自变量外，再引入另一个自变量 n，表示植物器官的生长阶段，控制拟南芥各器官的发生顺序，公理和部分产生规则程序如下

```
L－system: 1
derivation length: STEPS
Axiom: /(VANG) &(5) ;(1) A(0,0)
A(t,n) → A(t+dt,n)  /* 公理 */
I(t) → I(t+dt)  /* 主茎 */
J(t,l) → J(t+dt,l)  /* 侧枝 */
L(t) → L(t+dt)  /* 莲座叶 */
K(t) → K(t+dt)  /* 花 */
B(dir,t) → B(dir, t+dt) /* 角度 */
R(t) → R(t+dt)  /* 花瓣 */
D(t,k) → D(t+dt,k)  /* 叶片 */
P(t) → P(t+dt)  /* 侧枝叶片 */
decomposition
A(t,n): n==0 && t>0 && t<=30 →L(t)[B(1,t)[/(290)-(20)P(t-8)]][B(-1,t)[/(120)-(20)P(t-10)]][B(-1,t)J(t-5,2.5)][\(79)B(1,t)J(t-5,1.8)][/(90)B(-0.5,t)J(t,1.6)]A(t,n+1)
A(t,n): n==1 && t>0 && t<=30 →I(t)A(t,n+1)
A(t,n): n==2 && t>0 && t<=30 →[B(1,t)[/(90)-(20)P(t)]J(t-1,1.1)]A(t,n+1)
A(t,n): n==3 && t>0 && t<=30 →I(t)A(t,n+1)
A(t,n): n==4 && t>0 && t<=30 →[^(20)B(-1,t)[/(90)-(20)P(0.4*t)]J(t-2,1.3)]A(t,n+1)
A(t,n): n==5 && t>0 && t<=30 →J(t,1.2)
```

如图 8 所示，为本文所提出的拟南芥生长模型产生规则 $A(t,n)$ 简图。从图中可以直观地看到，拟南芥植株整体被看作一个基元，其被分为多个子基元；其中，$A(t,1)$ 描述拟南芥莲座叶整体 $L(t)$ 及初始主茎，$A(t,n)(n>1)$ 为茎秆及其子结构部分。很显然，各个子基元依靠变量 n 进行程序控制，每个子基元又被表达为主茎节间、侧枝、侧枝叶片、花、叶片（分别对应函数 $I(t)$、$J(t,l)$、$P(t)$、$K(t)$、$D(t,k)$）等器官。这将一个复杂的产生规则变得简单化、条件化。换言之，把整个拟南芥作为一个复杂的基元，将其拆解为多个有一定顺序的子基元进行描述，再整体进行步为 dt 的迭代生长。如此，看似无法进行基元“重写”的复杂结构，即能较为简便地使用 L－system 设计产生规则。此外，引入自变量 n 后，除了可以通过自变量 t 在时间上参数化控制器官的生长，还可以通过自变量 n 判断器官的生长阶段，控制器官的生长速度。例如在侧枝的生发过程中，多个侧枝作为不同的子基元，其基本结构组成一致，而自变量 n 不一致（即产生的顺序不一致，发育程度不一致），因此通过 n 也可以来分别控制对应的子基元的生长状态。

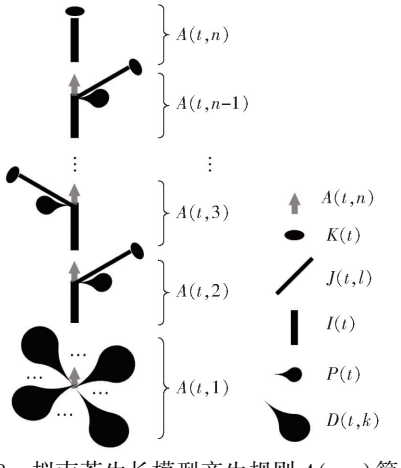


图 8　拟南芥生长模型产生规则 $A(t,n)$ 简图

Fig. 8　Sketch of growth axiom $A(t,n)$ of *Arabidopsis thaliana*

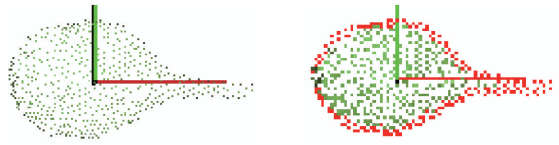
3.3　基于计算机图形学的可视化模块设计

3.3.1　叶片建模

首先重建叶片点云坐标系。叶片点云为三维空间点云，为方便研究，需将叶片点云投影到合适的二维平面。定义此二维平面垂直于叶片点云的法向量，定义二维平面上 x 轴为沿叶脉方向（对应叶片长度方向），y 轴垂直叶脉方向（对应叶片宽度方向），定义坐标原点为叶片点云的重心。

采用主成分分析（Principal component analysis，PCA）方法，重新计算叶片点云坐标系。由于是三维空间坐标系，因此可以得到 3 个特征值 $\boldsymbol{\lambda}_0$、$\boldsymbol{\lambda}_1$、$\boldsymbol{\lambda}_2$ 及其特征向量 $\boldsymbol{e}_0$、$\boldsymbol{e}_1$、$\boldsymbol{e}_2$。其中 $\boldsymbol{e}_0$ 表示空间点云中最密集的方向，即 x 轴方向；$\boldsymbol{e}_1$ 表示过中心点且与 $\boldsymbol{e}_0$ 垂直的平面上点云最密集的方向，即 y 轴方向；$\boldsymbol{e}_2$ 为

$\boldsymbol{e}_1$ 和 $\boldsymbol{e}_0$ 通过右手法则确定的方向,即 z 轴方向。生成的叶片点云的新坐标系如图 9a 所示,其中红色表示 x 轴正半轴,绿色表示 y 轴正半轴,z 轴图中不可见,其正方向为垂直纸面向外。



(a) 叶片点云及其新坐标系 (b) 叶片点云边界识别

图 9 叶片点云边界提取

Fig. 9 Extraction of leaf boundary point clouds

然后提取叶片点云的边界点云。使用 PCL 中 BoundaryEstimation 对叶片点云的边界进行检测,计算单个点云与其邻域点构成的向量之间的夹角,如果超出设定的最大角度阈值,则识别为边界点。边界点的识别效果受邻域点数量及最大角度阈值影响。

图 9a 所示的叶片点云使用本系统测量出的面积为 1.074 cm^2,近似看作为单位面积;同时此叶片的点云较为饱满,轮廓清晰,因此可将其轮廓作为生长模型中的叶片样例。设置近邻搜索点数量为 10 个,最大角度阈值为 60°,识别出的叶片边界点云如图 9b 中红色部分所示。

对叶片边界点云进行曲线拟合。为简化模型,将边界点云投影到 xy 平面,保留点云的 x、y 坐标值作为数据点,以 x 轴为中心线,默认建模时叶片为对称形状,此处选取 $y > -0.05$ 的点云,进行多项式拟合。尝试可得,5 次多项式曲线的拟合精度较好($y = 1.699x^5 - 0.051x^4 - 0.661x^3 - 0.891x^2 - 0.102x + 0.445$),既能够表达出轮廓形态,又不致过拟合(过拟合指曲线会经过此样本的大部分数据点,造成曲线与此叶片太过于相似,反而失去普遍性),如图 10 中蓝色曲线所示;获取此曲线方程后,推出此曲线对应的 B 样条曲线控制点,在 L-studio 中的表面设计页面(surfaces)中绘制拟南芥叶片并命名为 leaf. s。

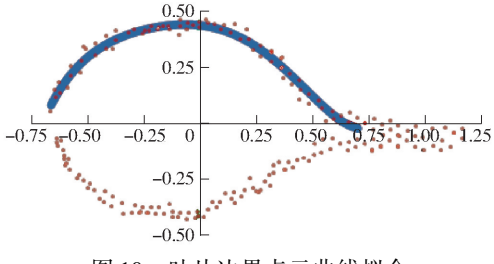


图 10 叶片边界点云曲线拟合

Fig. 10 Fitting function of leaf boundary point clouds

莲座叶片的生长函数 $D(t,k)$ 的可视化描述为 $\sim l$(LEAFSIZE_i),其中符号 ~ 含义为调用一个表面,此处调用预先绘制好的表面 leaf. s,其已在可视化模块中被命名为 l;表面的生长参数受到函数 LEAFSIZE_i 控制,不同的叶片有相应的生长函数。定义生长函数 LEAFSIZE_i = A * func(leafsize_i, t/DURATION),其中 A 为叶片最大面积;leafsize_i 为控制函数,需要在 L-studio 函数定义页面(functions)中绘制;t 为迭代时间,DURATION 为总的迭代次数,t/DURATION 将时间标准化为 0 ~ 1。由于所绘制的叶片面积近似为 1 cm^2,因此在各叶片的生长函数控制下,叶片各时期的面积可近似为生长函数所对应的值。

基于横、纵坐标值固定为[0,1]的网格,在 L-studio 函数定义页面中绘制控制函数 leafsize_i,绘制方式为通过定义控制点的坐标从而绘制函数的贝塞尔曲线,以此作为控制函数。因此要将通过生长试验获得的各叶片的生长曲线标准化为横、纵坐标为[0,1]的坐标系,并近似为贝塞尔曲线,获取曲线的控制点坐标。

3.3.2 茎的建模

相对于叶片而言,茎的形态简单,可近似看做截面为圆的弯曲柱体。因此其可视化描述为 F(INTNOD),其中 F 为绘制线段命令,绘制的长度受函数 INTNOD 控制。定义主茎生长函数 INTNOD = LEN * func(internode, t/DURATION),其中 LEN 为茎的最大长度值,由于定义拟南芥生长模型产生规则时将主茎分成了 n 个子基元,此处 INTNOD 对应的即为子基元的生长,因而 LEN 取主茎生长曲线最大值的 $1/n$;internode 为控制函数,如叶片的控制函数 leafsize_i 一样,同样需要将通过生长试验获得的曲线进行标准化并近似为贝塞尔曲线,绘制在 L-studio 中。

3.3.3 其他建模

在 L-studio 中有专门的可视化模块(view),在其中需要预先定义一些可视化参数。包括初始的颜色、线宽、观察视角、投影方式、光照方向等;除此之外,还包括表面(surface)、函数(function)、轮廓(contour)的声明,可视化模块参数及声明如表 2 所示。

在参数定义项目中,颜色通过编号对应 L-studio 颜色编辑器中自定义的颜色,在生长程序中默认为 initial color 指向的颜色;同样的,线宽在默认情况下也为 initial line width 所定义的宽度;观察模型的视角为空间中一个坐标点,点的坐标(x,y,z)通过 viewpoint 定义,由于在计算机图形学中,垂直可视化窗口平面指向观察者方向一般定义为 z 轴正方向,因此坐标值 z 要保证为正数才能够正常显示模型对象;线型(line style)为圆柱体,所呈现的线段都是圆柱状,其他还可以选择单线条、平面线条等;光源方

表 2　L-studio 可视化模块设置

Tab. 2　Set of visualization module in L-studio

参数定义项目	声明项目
initial color：72	function：BR_ANGLE. func 100
color increment：1	function：internode. func 100
initial line width：1	function：leafsize_1. func 100
line width increment：0. 01	⋮
viewpoint：－1，0，30	function：leafsize_11，func 100
projection：parallel	function：mainstem. func 100
front distance：－1000. 0	surface：p petal. s 2 9 9
back distance：1000. 0	surface：l leaf. s 1 9 9
render mode：shaded	surface：b leafbranch. s 1 9 9
line style：cylinder	contour：1 SEPAL. con

向(light direction)定义的是光源所在的空间位置，实际显示效果为从此位置照射到坐标原点方向。

在声明项目中，主要是将另外定义的一些文件以合适的方式重新定义，以方便生长程序的调用。相关的项目包括函数曲线、表面以及轮廓，分别可在 L-studio 的 functions、surfaces 和 contours 菜单中绘制并命名。

3.4　三维生长模型拟合效果

基于拟南芥叶片面积与主茎生长规律的拟合函数，结合叶片的形态，在 L-studio 平台中模拟出拟南芥的三维生长模型。模型的拟合效果如图 11 所示，拟南芥样本相应阶段的实际图像如图 12 所示。成熟期的拟南芥虚拟生长模型和真实样本图像如图 13 所示。

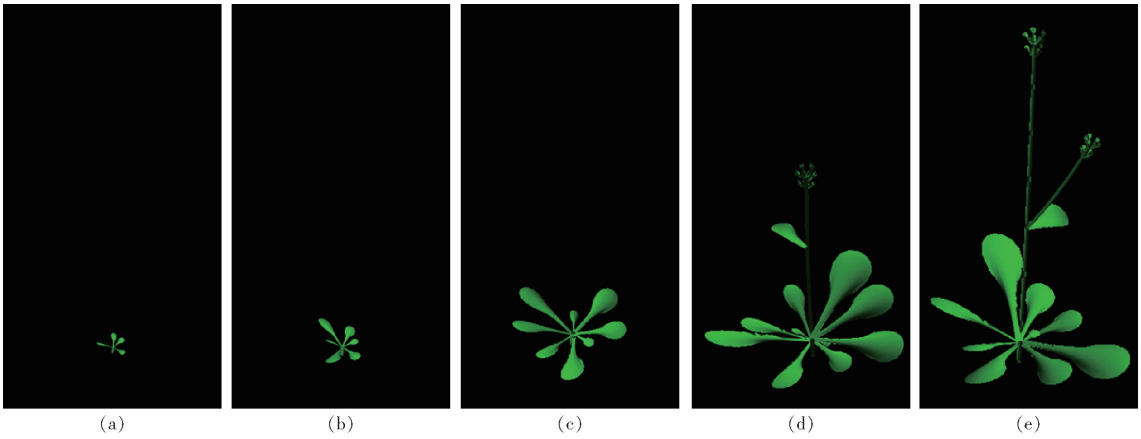


图 11　拟南芥虚拟模型的生长过程图

Fig. 11　Diagrams of growth process of *Arabidopsis thaliana* model

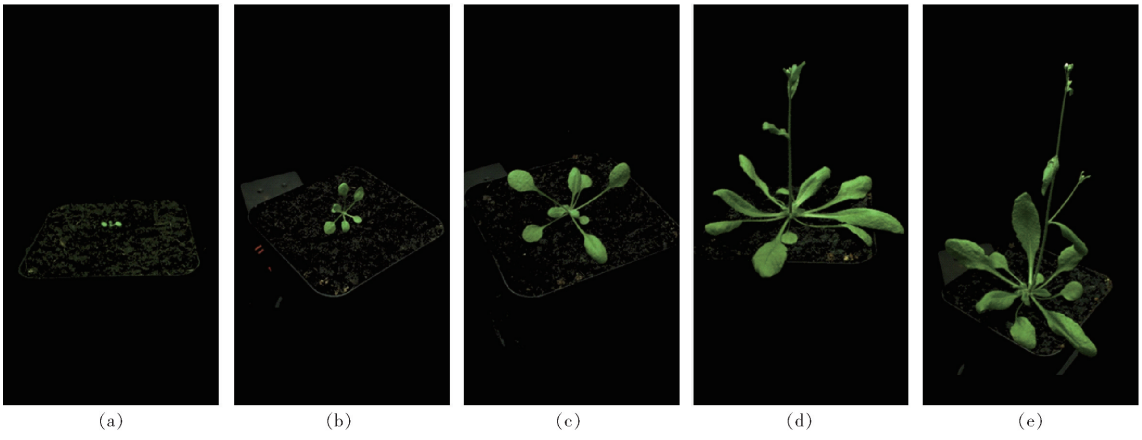


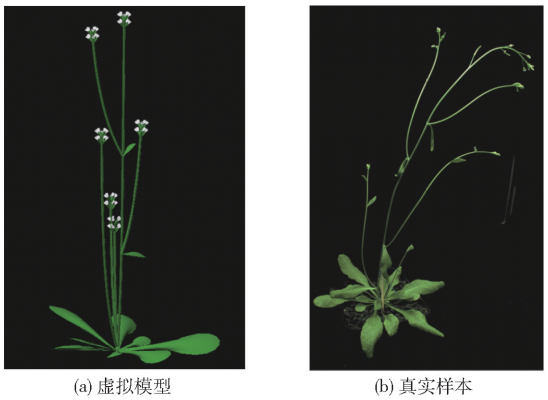
图 12　拟南芥真实样本生长过程图

Fig. 12　Diagrams of growth process of *Arabidopsis thaliana* specimen

根据三维虚拟生长模型各阶段图像与样本实际图像对比，可以看到模型的模拟效果较为逼真，且较大程度上再现了实际生长过程。为了方便展示，拟南芥虚拟模型各阶段的图像观察角度与样本实际图像尽可能一致，而非同一个角度；由于本文中生长模型仅研究了叶片及主茎部分，其他的诸如侧枝生长、花的开放暂未做深入的模型研究，因此在部分细节上未完全匹配。除此之外，由于生长模型是基于样本表型参数所拟合出来，并不完全与某一样本某一阶段完全同步。

4　结论

(1)设计植物固定、传感器移动的平台结构，解决了传统的传感器固定、植物移动的方式导致植物



(a) 虚拟模型 (b) 真实样本

图 13 拟南芥成熟期效果

Fig. 13 Mature stage of *Arabidopsis thaliana*

在拍摄过程中容易发生茎秆晃动、叶片抖动,从而影响三维重建效果的问题,利用运动中恢复结构算法快速、准确、可靠地提取了植物表型参数。

(2)提出基于彩色标板的点云坐标系标准化方法,能够从硬件的角度出发,满足多次采集的三维模型坐标系保持统一的要求,实现用同一套工具和算法且不需要多次更改环境或算法参数的情况下,在每个单位时间都能够对拟南芥植物对象进行参数提取。

(3)与传统的人工接触式测量方法相比,使用本系统交互测量的拟南芥叶片宽度、叶片长度、主茎长度、叶片面积、叶片间夹角的平均相对误差分别为 9.83%、10.10%、1.07%、4.09% 和 4.37%,可满足拟南芥的形态表型分析需要。

(4)构建了生长可视化模型,直观表达了拟南芥样本各叶片面积与主茎生长的过程,反映了拟南芥在时间上的动态变化和空间上的层次结构,不仅验证了面向拟南芥表型分析的机器视觉系统的可靠性和实用性,也为了解和解释拟南芥的生长机理、调节和控制其生长过程以及预测其生长趋势提供了技术参考。

参 考 文 献

[1] 潘映红. 论植物表型组和植物表型组学的概念与范畴[J]. 作物学报,2015,41(2):175 - 186.
PAN Yinghong. Analysis of concepts and categories of plant phenome and phenomics[J]. Acta Agronomica Sinica,2015,41(2):175 - 186. (in Chinese)

[2] 林雪锋,颉洪涛,虞木奎,等. 盐胁迫下 3 种海滨植物形态和生理响应特征及耐盐性差异[J]. 林业科学研究,2018,31(3):95 - 103.
LIN Xuefeng,XIE Hongtao,YU Mukui,et al. Morphological and physiological response and salt-tolerance differences of three coastal plants under salt stress[J]. Forestry Science Research,2018,31(3):95 - 103. (in Chinese)

[3] 吴培培,孙冰,罗水兴,等. 岭南槭不同种源家系种子形态和幼苗生长变异[J]. 林业科学研究,2017,30(6):1015 - 1021.
WU Peipei,SUN Bing,LUO Shuixing,et al. Variation of seed morphology and seedling growth among different provenances and families of acer tutcheri [J]. Forest Sotence Research,2017,30(6):1015 - 1021. (in Chinese)

[4] GOUDRIAAN J,VAN LAAR H H. Modeling potential crop growth processes: textbook with exercises[M]. Berlin: Springer Science & Business Media,2012.

[5] YENDREK C R,TOMAZ T,MONTES C M,et al. High-throughput phenotyping of maize leaf physiological and biochemical traits using hyperspectral reflectance [J]. Plant Physiology,2017,173(1):614 - 626.

[6] 刘洪波,白云岗,张江辉,等. 微喷条件下葡萄叶绿素质量比及荧光参数变化特征[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(9):892 - 896.
LIU Hongbo,BAI Yungang,ZHANG Jianghui,et al. Study on chlorophyll content and fluorescence parameters of grape under micro spray conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(9):892 - 896. (in Chinese)

[7] AN Nan, CHRISTINE M P, ROBERT L B, et al. Plant high-throughput phenotyping using photogrammetry and imaging techniques to measure leaf length and rosette area[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2016,127(1):376 - 394.

[8] CRUZ J A,YIN X,LIU X,et al. Multi-modality imagery database for plant phenotyping[J]. Machine Vision & Applications,2016,27(5):1 - 15.

[9] SIRAULT X,FRIPP J,PAPROKI A,et al. PlantScan: a three-dimensional phenotyping platform for capturing the structural dynamic of plant development and growth[C]// International Conference on Functional-Structural Plant Models,2013.

[10] XIONG Xiong,YU Lejun,YANG Wanneng,et al. A high-throughput stereo-imaging system for quantifying rape leaf traits during the seedling stage[J]. Plant Methods,2017,13(1):7 - 23.

[11] 郭庆华,吴芳芳,庞树鑫,等. Crop 3D—基于激光雷达技术的作物高通量三维表型测量平台[J]. 中国科学:生命科学,2016,46(10):1210 - 1221.
GUO Qinghua, WU Fangfang, PANG Shuxin, et al. Crop 3D: a platform based on LiDAR for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. SCIENTIA SINICA Vitae,2016,46(10):1210 - 1221. (in Chinese)

[12] 刘刚,张雪,宗泽,等. 基于深度信息的草莓三维重建技术[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):160 - 165.
LIU Gang,ZHANG Xue,ZONG Ze,et al. 3D reconstruction of strawberry based on depth information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):160 - 165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170421&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.021. (in

Chinese)
[13] GOLBACH F, KOOSTRA G, DAMJANOVIC S, et al. Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping[J]. Machine Vision & Applications, 2016, 27(5): 663 - 680.
[14] THAPA S, ZHU Feiyu, HARKAMAL W, et al. A novel LiDAR-based instrument for high-throughput, 3D measurement of morphological traits in maize and sorghum[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1187.
[15] KHAN Z, CHOPIN J, CAI J, et al. Quantitative estimation of wheat phenotyping traits using ground and aerial imagery[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 950.
[16] CHU Tianxing, MICHAEL J S, MICHAEL J B, et al. Characterizing canopy height with UAS structure-from-motion photogrammetry—results analysis of a maize field trial with respect to multiple factors[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(8): 753 - 762.
[17] WU C. Towards linear-time incremental structure from motion[C]// 3DV-Conference, International Conference on IEEE Computer Society, 2013: 127 - 134.
[18] WU C, AGARWAL S, CURLESS B, et al. Multicore bundle adjustment[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2011: 3057 - 3064.
[19] 王可,郭浩,刘威林,等. 基于点云旋转归一化的猪体体尺测点提取方法[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊1):253 - 259.
WANG Ke, GUO Hao, LIU Weilin, et al. Extraction method of pig body size measurement points based on rotation normalization of point cloud[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 253 - 259. (in Chinese)
[20] 吴文美. 基于 L-systems 的植物功能结构生长模拟研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
WU Wenmei. Plant functional structure growth simulation based on L-systems[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)
[21] JIAO Xiang, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, et al. Comparative analysis of nonlinear growth curve models for *Arabidopsis thaliana* rosette leaves[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(6): 114.
[22] ARCHONTOULIS S V, MIGUEZ F E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(2): 787 - 798.
[23] WARSHANI W S, KUSUMASTUTI P. Describing the height growth of corn using Logistic and Gompertz model[J]. Agrivita Journal of Agricultural Science, 2013, 35(3): 237 - 241.

(上接第 95 页)

[15] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(22):1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)
[16] 刘文忠,赵满全. 免耕播种机气吸式排种装置排种性能研究[C]//中国农业工程学会学术年会论文摘要集,2007.
[17] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
[18] 王延耀,李建东,王东伟,等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):54 - 58,89.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 54 - 58, 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2012s11&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.011. (in Chinese)
[19] 石林榕,赵武云,孙伟,等. 电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J/OL]. 农业工程学报,2017,33(4):32 - 38.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 32 - 38. (in Chinese)
[20] 石林榕,赵武云,孙伟,等. 电驱式玉米膜上直插穴播机前进速度补偿机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):87 - 94.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 87 - 94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.009. (in Chinese)