doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.020

基于三维点云的苹果树冠层点--叶模型重建方法

郭彩玲^{1,2} 刘 刚^{1,3}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 唐山学院机电工程系, 唐山 063000;

3. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了快速重建苹果树冠层结构三维模型,以纺锤体苹果树冠层为研究对象,利用地面三维激光扫描仪获取冠 层三维点云,提出了苹果树冠层点-叶模型重建方法。首先,提出了苹果树冠层叶基自动提取方法,可获取苹果树 冠层生长期和叶幕稳定期的叶基,与手工提取的叶基对比分析表明,两种方法重合度较高、误差较小,两种方法的 平均欧氏距离为1.41 mm;其次,提出了基于冠层体素化的叶基提取方法,构建了苹果树冠层点模型,并在叶基上拼 接叶片模板,构建出苹果树冠层点-叶模型;最后,利用 VegeSTAR 光模型计算光截获进行验证分析,与常规数字化 仪测得数据相比,本文方法提高了苹果树冠层三维结构重建效率。

关键词:苹果树;冠层三维点云;叶基;点-叶模型;结构重建

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0173-08



Reconstruction Method of Apple Tree Canopy Point – Leaf Model Based on 3D Point Clouds

GUO Cailing^{1,2} LIU Gang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Electromechanical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The fine structure inside the canopy of apple tree determines the light distribution and is one of the important factors affecting the quality and yield of apples. Aiming to rapidly generate apple tree canopy 3D reconstruction model to study the illumination distribution in it, a point - leaf model reconstruction method of apple canopy based on point cloud data was proposed. A Trimble TX8 was used as a data acquisition device to obtain 3D point clouds of the canopy in the flowering, leaf growth stage and stable growth stages of apple tree as the research object. Firstly, a leaf spatial location (LSL) extraction approach using density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) and layers K-means and median methods was proposed. In the LSL extraction progress, the DBSCAN clustering method based on adaptive parameters was used to extract the point cloud of single-leaf branches. And the same point cloud was sliced into layers, and the K-means and median method was used to fit the branch center line. And then, the Euclidean distance of each point between the single blade and the center line was determined, and the point with the smallest Euclidean distance (ELD) was the LSL point. Field experiments showed that the method proposed was suitable for LSL extraction during leaf growth and stable growth stage. Through comparative analysis between the automatical algorithm and artificial use of Realworks software extraction point showed that the average ELD between these two methods was 1.41 mm. Secondly, the whole apple tree canopy LSL was extracted by canopy voxelization,

收稿日期:2019-08-08 修回日期:2019-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700503)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2017417)和河北省唐山市科学技术研究 与发展规划项目(19150227E)

作者简介:郭彩玲(1976—),女,博士生,唐山学院副教授,主要从事自动化与信息化技术研究,E-mail: gcl@ alu. cau. edu. cn

通信作者:刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究,E-mail: pac@ cau. edu. en

and the point model was constructed. Using the leaf templete to splice the LSL, the point – leaf model was formed. The light interception calculation (STAR value) in the VegeSTAR light model showed that the 3D reconstruction efficiency was improved greatly. Therefore, the point – leaf model reconstruction method was effective.

Key words: apple tree; 3D point clouds of canopy; leaf spatial location; point - leaf model; reconstruction

0 引言

虚拟植物为景观和生长建模、农艺过程模拟等 提供了技术服务和技术支撑,为修剪模拟和果园管 理技术的提升注入了新的活力^[1]。在计算机视觉 和计算机图形学中,三维重建可捕获真实三维物体 的形状和外观,进而分析光照分布,对于科学指导果 园管理具有重要意义^[2-4]。

为了快速无损获取果树表面几何信息、进行果 树三维重建,研究人员尝试了多种方法^[5-7]。通过 三维数字化仪^[8]获取树冠内部叶片位置研究树冠 结构,构建了由叶片组成的冠层结构模型,较准确地 反映了树冠内部结构,但试验过程存在人工操作过 程繁琐、三维重建效率低等不足^[9]。

三维扫描技术^[10]加快了获取冠层点云数据信息技术的发展^[11]。利用地面激光扫描仪获取树木冠层三维点云,在测量树木冠层投影面积与体积^[12]、三维重建木质化结构^[13]、计算森林生物量参数^[14]、重建骨架^[15-16]、提取和重建叶片边缘^[17-18]、测量枝干尺寸^[19-20]等方面,取得了较多研究成果。但是,这些研究大多注重大尺度范围内的树木几何参数信息,对于树冠内部器官细化结构以及冠层内部叶片空间位置研究较少。面对三维扫描获取的海量三维点云,如何提取有效点云信息、快速构建苹果树冠层三维结构模型,进而研究冠层光照分布^[21],仍是相关领域亟待解决的问题。

本文以纺锤体苹果树冠层为研究对象,采用地 面三维激光扫描仪获取冠层三维点云数据,提出叶 基自动提取方法,建立苹果树冠层点模型和点-叶模 型,以实现苹果树冠层快速三维重建。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

在中国农业大学苹果树采摘机器人试验基地 (北京市昌平区南口镇辛力庄村)开展苹果树冠层 三维点云数据采集工作。该试验基地年平均日照时 数2684h,年平均气温11.8℃。果园采用常规管理 方式进行春季修剪,行间有草,灌水条件良好,苹果 树高2.5~3.5m,株距2.5m,行距5m,行方向为东 西方向。

试验采用美国 Trimble 公司 TX8 型地面三维激

光扫描仪(图1)采集苹果树冠层三维点云数据。激 光扫描仪最大扫描范围为 340 m,测量速度为 106点/s,视场角为 317°×360°,扫描范围为 – 10°~ 10°,精度为 0.5°,采用脉冲激光测距,测量精度小于 0.5°,100 m 测距时,误差小于等于 2 mm。



图 1 地面激光扫描苹果树冠层示意图



1.2 试验方法

研究对象为随机选择果园自然生长状态下树龄 3~8 a 的纺锤形宫藤富士苹果树(11 棵)。试验不 考虑扫描环境诸如温湿度、大气压等参数的影响。 数据采集时间为2015—2019年的6、9月,风速小于 1.6 m/s 时采集的数据作为预处理前的三维点 云^[11]。

采用五站扫描方式来扫描苹果树冠层,如图 1 所示,直径为 145 mm 的标靶球作为点云配准依据, 扫描品质设置为 Level 3。利用 KDtree - ICP 算 法^[22]结合标靶球配准的方法^[11]配准三维点云, 图 2a 为TX8 型激光扫描仪获取的苹果树冠层三维 点云及配准过程,图 2b_~2d 为在 Realworks 12.0 软



Fig. 2 Extraction process of apple tree canopy point cloud data

件中提取冠层枝干部分三维点云过程。首先提取苹 果树冠层点云数据,并采用基于点云强度的提取方 法,剔除点云强度较低的散点,人工检查并删除软件 不能剔除的噪声点,获取单株苹果树冠层三维点云。 采用基于曲率的点云压缩方法,按照坐标轴曲率分 布压缩,利用 Matlab 软件中函数 pcdownsample 实 现.图 2d 为经过上述步骤处理之后的苹果树冠层三 维点云可视化图。

模型重建方法 2

叶基是叶柄-中脉连接点的空间坐标,可以描述 叶片在苹果树冠层中的空间位置[23],也是进行植物



图 3 苹果树叶序和叶片叶基

Fig. 3 Apple tree phyllotaxis and leaf spatial location

冠层结构分析的重要元素[24-25],利用叶片空间位置 及叶片基本参数可构成苹果树冠层[26]。图 3 为苹 果树冠层叶片叶序和叶基位置图。其中,1~5为叶 序,A~E为顶点,蓝色点为叶基,本文叶基提取算法 假设叶基为叶片上距离枝干中心最近的点。

2.1 模型重建方法流程

如图4 所示,苹果树冠层点-叶模型重建步骤 由4个核心部分组成:提取单叶片、提取枝条中心 线、提取叶基、点一叶模型重建。

2.2 提取单叶片

以2018年苹果树冠层为例,提取苹果树生长期 (5-7月)和叶幕稳定期(8-9月)冠层三维点云, 以节间距离较大[27]的营养长/短枝[28]作为研究对 象提取单叶片。

利用 DBSCAN 算法 (Density-based spatial clustering of applications with noise)^[25]分割苹果树冠 层三维点云时,点的邻域半径(Eps)和点云样本中 的距离为 EPS 的邻域中样本个数(Mintps)由点的特 征决定,需手工输入参数。针对本文获取的三维点 云密度,经过多次聚类试验,Eps 计算公式为

$$E_{ps} = \frac{G_{\text{ridstep}}D}{Q} \tag{1}$$

式中 Ens-----点的领域半径参数 Eps G_{ridstep}——三维点云预处理特征有关的量,为



Fig. 4 Flow chat of apple tree point - leaf model reconstruction

原点云数量与压缩之后的点云数 量比值

- D----被测量物体到扫描仪的距离,mm
- 0----扫描仪扫描指标有关的系数, Trimble TX8 型扫描仪中对应为 30000/22.6、 30000/11.3,30000/5

按照地面三维激光扫描仪的设置,30 m 点距为 5 mm(被测量物体到扫描仪的距离和扫描点间距的 线性变化关系),本文扫描苹果树冠层试验中,扫描 仪与树冠中心距离 D 为 3.5 m,点云压缩之后的点 云数量为原点云数量的 1/10(压缩后点云数量/未 压缩点云数量),Eps参考值为5.8。

自然环境下获取的苹果树冠层三维点云易产生 多层现象[9],为了保证叶片三维点云的完整性, Mintps 取值为4。

图 5a 为随机提取生长期苹果树冠层一根枝条, 进行 DBSCAN 聚类分割结果,其中,不同颜色表示 不同的类。图 5b 为分割后的各个类的数据可视化 图。根据每类点云数据中包含点云数量判断该类是 不是叶片,大于240的类记为叶片点云簇,小于或等 于240 的类丢弃。提取叶片点云簇数据,第r个单 叶片点集记为 $P_{\text{leaf}}(X_{l_{t}}, Y_{l_{t}}, Z_{l_{t}})$,图 5c 为提取的叶 片三维点云可视化图。

2.3 提取枝条中心线

苹果树冠层叶片按照图3所示叶序方式增加新 叶片^[20],且以枝条为中心展开,将苹果树冠层营养



Fig. 5 Process of extracting single leaf

枝三维点云收缩,拟合生成直线,即枝条中心线。

将枝条三维点云沿着垂直于地面方向(Z轴方向)按照相同的厚度均匀切片。切片厚度以大于叶片厚度为宜,本文点云数据切片厚度为5mm,并正投影到垂直于Z轴的平面(XOY面),遂在正投影面得到三维点云切片的正投影点集 Sxovi,每个点都由2 维实数组成。K-means 聚类时,目标函数J表示为

$$J = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} || p_i^{(j)} - c_j ||^2$$
(2)

式中 $p_i^{(j)}$ ——投影点云中任意一点 c_j ——聚类中心点

其中, $\|p_i^{(j)} - c_j\|^2$ 为 $p_i^{(j)} < c_j$ 数据点之间的选定距离。

图 6 是提取枝条中心线过程,其中图 6a 是枝条 三维点云任意一层的正面投影的聚类迭代结果,红 色点为 S_{xon}聚类中心坐标。



将聚类中心坐标的数量设置为 m,则聚类中心 坐标 m × 2 的二维数组为

$$\boldsymbol{C}_{2D} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_m & \boldsymbol{y}_m \\ \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{x}_2 & \boldsymbol{y}_2 \\ \boldsymbol{x}_1 & \boldsymbol{y}_1 \end{bmatrix}$$

以第 *i* 个切片 *Z* 轴向坐标为数值, 创建一维 *m*×1 向量

$$\boldsymbol{C}_{a} = (\boldsymbol{z}_{m}, \boldsymbol{z}_{m-1}, \cdots, \boldsymbol{z}_{1})^{\mathrm{T}}$$
组合 \boldsymbol{C}_{n} 和 \boldsymbol{C}_{a} 得到 $m \times 3$ 的三维数组

$$\boldsymbol{C}_{3D} = \begin{bmatrix} x_m & y_m & z_m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_1 & y_1 & z_1 \end{bmatrix}$$

计算 C_{3D} 任意 3 个相邻点的中值,记录中值点 的数值替换这 3 个点,如图 6b 所示,直到剩下 2 个 中值点便停止迭代,并输出这 2 个点的坐标

P_{cA}(*x_{cA}*,*y_{cA}*,*z_{cA}*)和*P_{cB}*(*x_{cB}*,*y_{cB}*,*z_{cB}*)。 枝条中心线的点向式方程*L*为

$$\frac{x - x_{CA}}{m} = \frac{y - y_{CA}}{n} = \frac{z - z_{CA}}{p} = t$$
(3)
式中 (x, y, z) ——直线 L 上任—点坐标
 (m, n, p) ——百线 L 的方向向量

2.4 提取叶基

计算任意点 $P_{\text{leafi}}(X_{Li}, Y_{Li}, Z_{Li}) \in P_{\text{leaf}}$ 到直线 L的距离

$$d(P_{\text{leafi}},L) = \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ x_{CA} - X_{Li} & y_{CA} - Y_{Li} & z_{CA} - Z_{Li} \\ m & n & p \end{vmatrix}}{|(m,n,p)|}$$
(4)

叶基的坐标为 $d(P_{\text{leafi}}, L)$ 最小值对应的 P_{leaf} 的坐标 $P_{\text{LSL}\circ}$

2.5 模型三维重建

按照营养枝条的生长位置,将苹果树冠层三维 点云体素化,图 7a 中每个绿色的立方体包含的点云 为一个枝条体素,提取枝条体素中的叶基坐标,构成 点集 P_{15L},图 7b 是点集 P_{15L}的可视化点模型。



栽培管理技术、苹果品种、中间砧、叶片在枝中 的生长位置、萎蔫程度等都会影响苹果树叶片分布 和形态^[29]。研究表明,叶片纵横比和叶面积是描述 苹果叶片关键指标^[30]。为了较精确地获取苹果树叶 片纵横比建立叶片模板,随机选取9月获取的苹果树 叶片 500 枚,借助 Geomagic 软件精确测量叶片长度和 宽度,计算叶片纵横比,取叶片纵横比平均值 25:18。 同时,借助 Geomagic 软件生成叶片实体造型,采用该软 件计算面积功能,计算单个叶片表面积,取算术平均值 49.9 cm²作为叶片表面积,以叶基为定位点,插入叶片 模板,建立基于叶基的苹果树冠层点-叶模型。

叶片在冠层中的空间位置由 6 个自由度确 定^[25,31],即空间 3 个坐标(叶基)表示叶片空间形态 的欧拉角(高度角 Rot(Y)、转角 Rot(X)和方位角 Rot(Z))。其中,富士苹果 80% 以上叶片欧拉角数 值:Rot(Y)为[-30°,60°]、Rot(X)为[-60°, 60°]、Rot(Z)为 145°。苹果树叶片以 Rot(Z)为 145°在枝干上呈螺旋分布。

为了快速重建点-叶三维模型,将欧拉角简化, 且以直线代替叶片中脉空间弯曲,忽略叶片边缘曲 率,叶片模板近似为六边形^[7],六边形面积和纵横 比与叶片表面积相同。叶片模板由6个点组成,受 到以下条件约束:六边形平面与*XOY*平面平行,6个 点按照顺时针方向定义,如图8a所示。



Fig. 8 Progress of reconstruction of point - leaf model

叶片模板插入步骤如下:

(1)初始化步长 $Z_{P_{1SL}}(i+1) - Z_{P_{1SL}}(i)$ 。

(2) P_{LSL}中提取第1个点坐标 P_{LSL}(x,y,z),插入六边形,六边形 A 点坐标为 P_{LSL}(x,y,z),其余点相对于 A 坐标分别为: B(x+0.27,y-0.36,z)、C(x+0.65,y-0.36,z)、D(x+1,y,z)、E(x+0.65,y+0.36,z)、F(x+0.27,y+0.36,z),6个点按照顺序连接封闭曲线。

(3) 叶片模板在 XOY 面以 A 点为中心旋转
Rot(Z),每隔一个步长旋转 145°。Rot(X)为
[-60°,60°]之间随机分布,Rot(Y)为[-30°,60°]之
间间隔 15°分布。

(4)绿色填充六边形空间,步长加1,重复上述 步骤,遍历所有点,构建出点-叶模型如图8c所示。

3 结果与分析

3.1 苹果树不同生长时期提取叶基结果

截取树冠中营养枝数据,对叶基提取算法的有

效性、运行参数等进行验证和分析。处于不同生长 阶段的苹果树冠层和叶、果等器官数量和大小不同。 图 9 为不同生长时期提取叶基效果图,图中不同颜 色代表不同叶片。从图中可见,本文提出的方法可 以提取苹果树不同生长阶段的叶基,图 9a、9b 分别 是生长期(6月)和叶幕稳定期(9月)叶基提取结 果。从图中可以看出,每个叶片都被完整分割,叶基 LGS_01、LGS_02、LGS_03、SGS_04、SGS_05、SGS_06、 SGS_07等均可提取。



Fig. 9 Leaf spatial location extraction results at different growth stages

3.2 本文算法提取叶基结果

为了验证本文叶基提取算法的适应性,在 Realworks 12.0 软件中手工提取叶基的空间坐标, 与自动提取叶基坐标算法进行比较。图 10 是 2017 年9月苹果树冠层营养枝叶基的自动提取与手工提



图 10 手动提取结果和本文算法提取结果可视化图 Fig. 10 Visualization of two leaf spatial location extraction methods

图 11 是手动提取叶基和利用本文算法提取叶 基坐标的误差分析图,可以看出,相对于手动提取, 二者提取的坐标平均欧氏距离为 1.41 mm。



Fig. 11 Error of leaf spatial location space coordinates

3.3 点-叶模型与光模型融合下的冠层光截获计算

VegeSTAR 是根据植物数字化冠层模型进行光 截获模拟计算的软件^[32],可计算灌木、森林幼苗、苹果 树的光截获。VegeSTAR 软件将天空等分为面积相等 的46个立体角的龟背天空^[33],并将龟背天空 46个方 向计算的光截获值 STAR(Silhouette to total area ratio) 加权计算得到冠层固定点时间内的 STAR 值。

将建立的点-叶模型导入 VegeSTAR 软件,通 过设置叶片面积和形状,输入叶基采集果园位置 的经纬度和采集时间,可计算出苹果树光照射叶 片投影面积和总面积,进而得到苹果树冠层的光 截获均值。

图 12 为点-叶模型与 VegeSTAR 融合计算冠层 光截获结果,图 12a 中将点-叶模型按照冠层高度, 每间隔 0.1 m 以不同颜色区分,图 12b 为冠层不同 高度的叶面积和光截获值计算结果。

在数据采集、模型重建、计算 STAR 值一系列过程 中,数字化仪模型重建1500 点左右的树冠三维模型需 要2d^[34],本文实例中点一叶模型对应研究对象为3a苹 果树,与文献[34]树形相同,叶基数量为633 点,重建 点一叶模型需要2~3h,三维重建效率有了较大提高。 表1列出2019年9月3棵3~4a 纺锤体苹果树,按照 不同方法对其进行三维重建所需要时间。



图 12 点-叶模型与 VegeSTAR 融合计算冠层光截获结果 Fig. 12 Point - leaf model with VegeSTAR fusion calculation canopy STAR

表 1 三维重建时间 Tab. 1 3D reconstruction time

样本编号	叶基数量	文献[34]方法/h	本文算法/h
A1	963	18	3.5
A2	691	15	3.0
A3	1 200	21	5.0

4 结论

(1)提出叶基自动提取方法,可自动提取苹果 树冠层生长期、叶幕稳定期叶基,试验分析表明,本 方法适用于生长期和叶幕稳定期的叶基提取,精度 较高。相对于人工利用 Realworks 提取叶基坐标,二 者之间的平均欧氏距离为1.41 mm。

(2)以叶基为基础建立空间点模型,并以此为 基础建立点-叶模型,利用点-叶模型,在 VegeSTAR 光模型中进行光截获计算,相对于利用文献[34]构 建模型方法,较大程度提高了三维结构重建效率。

(3)受冠层内部器官相互遮挡的影响,树膛内 部叶片的三维点云不完整,因此本文提出的方法适 用于冠层直径较小的苹果树(如树龄小于3a)。对 于直径较大的苹果树冠层,可以采用手持式扫描仪 获取树膛内部三维点云补偿。

参考文献

[1] 赵春江,陆声链,郭新宇,等.数字植物研究进展:植物形态结构三维数字化[J].中国农业科学,2015,48(17):3415-3428.

ZHAO Chunjiang, LU Shenglian, GUO Xinyu, et al. Advances in research of digital plant: 3D digitization of plant morphological structure [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3415-3428. (in Chinese)

[2] 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? file_no = 20140607&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.007. (in Chinese)

- [3] 彭飞,方芳,王红英. 基于三维激光扫描的大麦籽粒力学建模与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 342 348.
 PENG Fei, FANG Fang, WANG Hongying. Modeling and experiment on mechanical properties of barley grain based on 3D laser scanning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 342 348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181141&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.041. (in Chinese)
- [4] 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): 222 228.
 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): 222 228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190724&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.024. (in Chinese)
- [5] 赵春江,杨亮,郭新宇,等. 基于立体视觉的玉米植株三维骨架重建[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 157-162.
 ZHAO Chunjiang, YANG Liang, GUO Xinyu, et al. Corn skeleton reconstruction based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 157-162. (in Chinese)
- [6] 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. Research on plant three-dimensional information acquisition method [J].
 Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 142-147. (in Chinese)
- [7] GENARD M, BARET F, SIMON D. A 3D peach canopy model used to evaluate the effect of tree architecture and density on photosynthesis at a range of scales [J]. Ecological Modelling, 2000, 128(2-3): 197-209.
- [8] YANG W, CHEN X, SAUDREAU M, et al. Canopy structure and light interception partitioning among shoots estimated from virtual trees: comparison between apple cultivars grown on different interstocks on the Chinese Loess Plateau [J]. Trees-Structure and Function, 2016, 30(5): 1723 - 1734.
- [9] 周静静,郭新宇,吴升,等. 基于多视角图像的植物三维重建研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(2): 9-18. ZHOU Jingjing, GUO Xinyu, WU Sheng, et al. Research progress on plant three-dimensional reconstruction based on multiview images[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(2): 9-18. (in Chinese)
- [10] 魏学礼,肖伯祥,郭新宇,等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 373-377.
 WEI Xueli, XIAO Boxiang, GUO Xinyu, et al. Analysis of applications of 3D laser scan technology in plant scanning[J].
 Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 373-377. (in Chinese)
- [11] 郭彩玲,宗泽,张雪,等. 基于三维点云数据的苹果树冠层几何参数获取[J]. 农业工程学报, 2017,33(3): 175-181.
 GUO Cailing, ZONG Ze, ZHANG Xue, et al. Apple tree canopy parameters acquirement based on 3D point clouds [J].
 Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 175-181. (in Chinese)
- [12] 张卫正,董寿银,王国飞,等. 基于机载 LiDAR 数据的林木冠层投影面积与体积测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 304 309.
 ZHANG Weizheng, DONG Shouyin, WANG Guofei, et al. Measurement of trees crown projection area and volume based on airborne LiDAR data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 304 309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160141&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2016.01.041. (in Chinese)
- [13] DELAGRANGE S, ROCHON P. Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology[J]. Annals of Botany, 2011, 108(6SI): 991 – 1000.
- [14] TANG S, DONG P, BUCKLES B P. Three-dimensional surface reconstruction of tree canopy from LiDAR point clouds using a region-based level set method[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(4): 1373 - 1385.
- [15] WANG M, JU M, FAN Y, et al. 3D incomplete point cloud surfaces reconstruction with segmentation and featureenhancement[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15272 - 15281.
- [16] 师翊,何鹏,胡少军,等. 基于角度约束空间殖民算法的树点云几何结构重建方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 207-216.
 SHI Yi, HE Peng, HU Shaojun, et al. Reconstruction method of tree geometric structures from point clouds based on angle-constrained space colonization algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 207-216. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180227&flag = 1. DOI:10. 6041/j.issn.1000-1298.2018.02.027. (in Chinese)
- [17] 刘刚,张伟洁,郭彩玲. 基于动态 K 阈值的苹果叶片点云聚类与生长参数提取[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 163-169,178.

LIU Gang, ZHANG Weijie, GUO Cailing. Apple leaf point cloud clustering based on dynamic-K-threshold and growth parameters extraction [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 163 – 169,178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190418&flag = 1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298.2019.04.018. (in Chinese)

[18] 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? file_no = 2017s017&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2017. S0.017. (in Chinese)

- [19] PITKANEN T P, RAUMONEN P, KANGAS A. Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure[J]. SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 147(2): 294 – 306.
- [20] 骆钰波,黄洪宇,唐丽玉,等. 基于地面激光雷达点云数据的森林树高、胸径自动提取与三维重建[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2): 243-252.

LUO Yubo, HUANG Hongyu, TANG Liyu, et al. Tree height and diameter extraction with 3D reconstruction in a forest based on TLS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2): 243 – 252. (in Chinese)

- [21] 师翊,耿楠,胡少军,等. 基于随机森林回归算法的苹果树冠层光照分布模型[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):214-222.
 SHI Yi, GENG Nan, HU Shaojun, et al. Illumination distribution model of apple tree canopy based on random forest regression algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 214-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190525&flag = 1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 05. 025. (in Chinese)
- [22] GREENSPAN M, YURICK M. Approximate k-d tree search for efficient ICP[C] // Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003: 442 – 448.
- [23] CASELLA E, SINOQUET H. A method for describing the canopy architecture of coppice poplar with allometric relationships [J]. Tree Physiology, 2003, 23(17): 1153 - 1170.
- [24] YANG W, CHEN X, ZHANG M, et al. Light interception characteristics estimated from three-dimensional virtual plants for two apple cultivars and influenced by combinations of rootstocks and tree architecture in Loess Plateau of China [C] // X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management 1160, 2015: 245 - 252.
- [25] SONOHAT G, SINOQUET H, KULANDAIVELU V, et al. Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies[J]. Tree Physiology,2006,26(3):337 - 351.
- [26] SINOQUET H, PINCEBOURDE S, ADAM B, et al. 3-D maps of tree canopy geometries at leaf scale[J]. Ecology, 2009, 90(1): 283.
- [27] WILLAUME M, LAURI P E, SINOQUET H. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation
 [J]. Trees-Structure and Function, 2004, 18(6): 705 713.
- [28] DUURSMA R A, FALSTER D S, VALLADARES F, et al. Light interception efficiency explained by two simple variables: a test using a diversity of small- to medium-sized woody plants[J]. New Phytologist, 2012, 193(2): 397-408.
- [29] 杨伟伟.不同栽培方式和水分胁迫对苹果树体结构和功能影响的数字化模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2016.

YANG Weiwei. Studying the planting system and water stress effects on apple tree atchitecture and function with digitizing modelling[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

- [30] MIGICOVSKY Z, LI M, CHITWOOD D H, et al. Morphometrics reveals complex and heritable apple leaf shapes [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 5:2185.
- [31] 杨伟伟. 基于三维模型的苹果树形光截获评价研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012. YANG Weiwei, Evaluation of light interception of apple tree canopy based on 3-dimensional model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [32] ADAM B, DONES N, SINOQUET H. VegeSTAR v. 3.1: a software to compute light interception and photosynthesis by 3D plant mock-ups[C]//Fourth International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 2004: 414.
- [33] DAUZAT J, RAPIDEL B, BERGER A. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(2): 143-160.
- [34] 杨伟伟,陈锡龙,刘航空,等. 矮化中间砧短枝富士苹果高纺锤树形冠层结构与光能截获的三维模拟[J]. 中国农业 科学, 2014, 47(23): 4680 - 4694.

YANG Weiwei, CHEN Xilong, LIU Hangkong, et al. Three-dimensional simulation of canopy structure and light interception for tall spindle shape of spur 'fuji' apple with dwarf interstock[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(23): 4680 - 4694. (in Chinese)