

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S1.029

基于三维点云的群体樱桃树冠层光照分布预测模型

刘刚¹ 尹一涵^{1,2} 郑智源^{1,2} 周少清² 李红娟² 侯冲³

(1. 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;
2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 合理的果树冠层结构和栽培密度可提高其冠层内光截获量,对提升果实产量和质量有重要影响。本文以细纺锤形樱桃树为研究对象,构建了基于三维点云的群体樱桃树冠层光照分布预测模型。使用 Azure Kinect DK 相机获取群体樱桃树三维点云数据,通过点云数据预处理得到完整的群体樱桃树三维点云数据。在冠层尺度内,对樱桃树冠层点云数据进行分层,提取不同区域的点云颜色特征。提出基于 Delaunay 三角化凹包算法的点云投影面积计算方法,通过凹包边界点提取和向量积叉乘,计算不同区域的点云投影面积。以点云颜色特征和相对投影面积特征为输入,以实测相对光照强度为输出,建立群体樱桃树冠层光照分布预测模型。试验结果表明,该模型能够较为准确地预测樱桃树冠层内的光照分布,预测值与实际值决定系数平均值为 0.885,均方根误差为 0.071 6。研究结果可为樱桃树合理的种植密度管理及樱桃树休眠期自动化剪枝等提供技术支持。

关键词: 群体樱桃树;栽培密度;三维点云;投影面积;光照分布预测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0263-07

Light Distribution Prediction Model of Group Cherry Trees Canopy Based on 3D Point Cloud

LIU Gang¹ YIN Yihan^{1,2} ZHENG Zhiyuan^{1,2} ZHOU Shaoqing^{1,2} LI Hongjuan² HOU Chong³

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: A reasonable canopy structure and cultivation density of fruit trees can increase the amount of light interception within their canopies, which has an important impact on improving the yield and quality of fruit. A 3D point cloud-based model for predicting the canopy light distribution of group cherry trees was proposed by using a thin spindle-shaped cherry tree as the research object. Firstly, the Azure Kinect DK camera was used to obtain the 3D point cloud data of the group cherry trees, and the complete 3D point cloud data of the group cherry trees were obtained through point cloud data pre-processing. Secondly, according to the actual cherry tree canopy segmentation method, the point cloud data of cherry tree canopies were point cloud stratified and the point cloud colour features of different regions were extracted. Again, a point cloud projection area calculation method based on the Delaunay triangulated concave packet algorithm was proposed to calculate the point cloud projection area of different regions through concave packet boundary point extraction and vector product fork multiplication. Finally, a model for predicting the light distribution in the canopy of group cherry trees was developed, which was a random forest model with point cloud colour characteristics and relative projected area characteristics as input and measured relative light intensity as output. The experimental results showed that the model was able to predict the light distribution in the canopy of cherry trees with a mean coefficient of determination of 0.885 and root mean square error of 0.071 6. The research results can provide technical support for

收稿日期: 2022-06-18 修回日期: 2022-08-09
基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020MC084)
作者简介: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术农业应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn
通信作者: 李红娟(1978—),女,副教授,主要从事酿酒葡萄栽培及品种选育研究,E-mail: 313471105@qq.com

reasonable planting density management and automated pruning of cherry trees during dormancy.

Key words: group cherry trees; cultivation density; three-dimensional point cloud; projected area; illumination distribution prediction

0 引言

太阳光是果树光合作用的主要能量来源^[1],果树群体种植时,树木之间相互遮挡会导致果树冠层内部结构的变化,影响其内部光照分布。樱桃树为喜光树种,合理的冠层结构和栽培密度对提高樱桃的产量和质量有重要意义^[2-3]。

传统的冠层光照分布研究主要基于三维数字化仪^[4],该方法可以较为准确地重构果树三维模型,并用于模拟光照变化,但重构模型速度慢且缺乏颜色信息。随着计算机视觉和传感器技术的快速发展^[5],利用三维激光扫描技术设备,可快速准确重构果树三维模型,研究其冠层光照分布规律。马晓丹等^[6]使用 Trimble TX5 型地面三维激光扫描仪,以“顶视法”获取苹果树冠层三维点云数据,并构建了以点云颜色特征为输入,相对光强为输出的模糊神经网络。郭彩玲等^[7]通过分析苹果树休眠期冠层结构特征和叶幕期冠层相对光照分布特征,提出了基于计盒维数的光照分布预测方法。以上两种方法均存在数据采集设备较为昂贵的问题。廖崴等^[8]使用像素占比和 Gramham 扫描算法计算有效叶面积指数,构建了以苹果树冠层有效叶面积指数为自变量,相对光照强度为因变量的线性回归模型,该模型有较好的预测精度,但有效叶面积指数计算过程较为复杂。师翊等^[9]使用改进的空间殖民算法和叶序添加规则重构果树的三维模型,并提出了基于随机森林回归算法的苹果树光照分布模型。以上研究均针对的单棵果树,未考虑果树群体种植时,相邻果树遮挡对果树冠层光照分布的影响。

本文以温室内的细纺锤型群体樱桃树冠层为研究对象,利用 Azure Kinect DK 相机获取群体樱桃树点云数据,构建完整的群体樱桃树三维点云数据,研究群体樱桃树冠层光照分布预测方法,以期为樱桃树合理的种植密度管理^[10]及樱桃树休眠期自动化剪枝^[11]等提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

在烟台市农业科学研究院温室樱桃树种植基地(山东省烟台市福山区)开展群体樱桃树冠层光照分布预测研究。樱桃树为4年生细纺锤体,以可移动的盆栽方式种植,自然光环境下生长,树高为

1.8~2 m,如图1所示。



图1 实验场地
Fig.1 Experiment site

采用 Azure Kinect DK 相机^[12]采集群体樱桃树冠层三维点云数据。该 DK 相机基于飞行时间(Time of flight, TOF)原理,设定的部分参数如表1所示。

表1 Azure Kinect DK 相机部分参数
Tab.1 Partial parameters of Azure Kinect DK camera

参数	数值
有效距离/m	0.35~0.50
帧频率/(f·s ⁻¹)	30
彩色相机分辨率/(像素×像素)	1 920×720
深度相机分辨率/(像素×像素)	640×576
视场角/(°)	90×59

采用美国 Onset 公司 HOBO UA-002-64 型温度/光度(防水)数据记录器,测量樱桃树冠层空间光照强度。

1.2 点云数据获取及预处理

采集对象为温室内群体樱桃树,任选4棵相邻樱桃树为代表,模拟群体樱桃树,按照温室内樱桃树种植实际情况,其摆放方式为2×2,组成边长为50 cm的矩形排列,DK相机位于群体樱桃树2.5 m的位置处,4个直径120 mm的标靶球分别放置于距离群体樱桃树80 cm左右的位置处,采集现场如图2所示。由于樱桃树为细纺锤形且株型较小,为获取完整的群体樱桃树点云数据,用DK相机对群体樱桃树进行四站式扫描,如图3所示。

DK相机获取的群体樱桃树点云数据首先需要对数据进行预处理,如图4所示。原始的群体樱桃树点云数据中包含大量噪声点和冗余点,如图4a所示。使用直通滤波算法^[13]和统计滤波算法^[14],去除原始群体樱桃树点云数据中的背景噪声和离群点噪声,点云去噪结果如图4b所示。使用基于Space采样方法对群体樱桃树点云进行精简,点云精简结果如图4c所示。单视角获取的点云数据不能包罗



图 2 群体樱桃树点云数据实验现场

Fig.2 Experimental site of point cloud data of group cherry trees

1. 计算机 2. 相机支架 3. Azure Kinect DK 相机 4. 标靶球
5. 樱桃树

完整的群体樱桃树三维信息,需要进行点云配准^[15-16],首先使用标靶球,对群体樱桃树点云数据进行粗配准,点云粗配准结果如图 4d 所示,其次,使用 KDTree-ICP 方法对群体樱桃树点云数据进行精

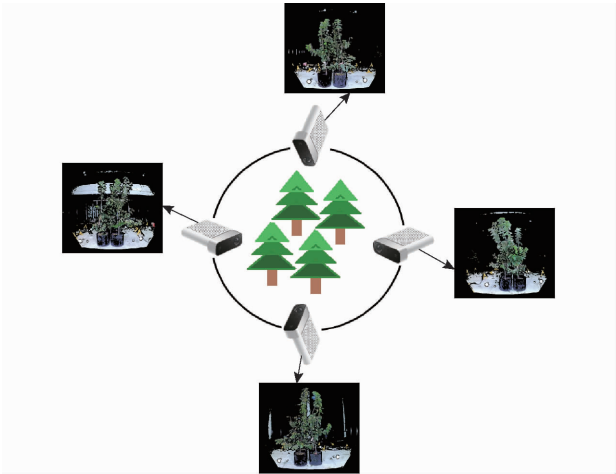


图 3 群体樱桃树三维信息采集示意图

Fig.3 Schematic of 3D information collection of group cherry trees

配准,点云精配准结果如图 4e 所示,即为最终得到完整的群体樱桃树点云数据。

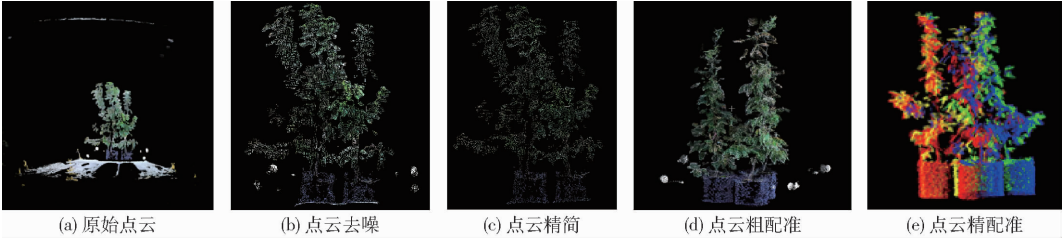


图 4 群体樱桃树点云数据预处理效果图

Fig.4 Effect diagrams of point cloud data preprocessing for group cherry trees

1.3 光照数据采集

为了分析樱桃树冠层自上而下的光照变化规律,需采集光照强度数据,如图 5 所示,本文设计了一种光照采集装置(图 5a),将光照传感器以 20 cm 为间隔用铁丝固定在钢管上。光照强度数据采集时间为 11:00—13:00,此时太阳高度角大,光照强度变化较为缓慢^[17]。光照传感器每间隔 1 min 记录 1 次光照强度。为减少人为因素对数据的影响,将 3 组光照采集装置同时插入 1 个樱桃树种植盆中,如图 5b 所示,取同一冠层空间中 3 个传感器获取的光照强度平均值,作为该冠层空间中光照强度。在无任何遮挡的位置处放置光照传感器作为空白对照组,以消除不同时刻太阳高度角的误差,导致樱桃树冠层光照强度不一致的问题。冠层光照强度与对照组光照强度的比值,即为相对光照强度。每棵樱桃树光照采集间隔为 5 min。

2 光照分布预测方法

由于樱桃树群体冠层内部的光照强度受栽培密度及自身冠层结构的影响,因此应该分析樱桃冠层点云数据中各层点云颜色特征以及相对投影面积特



图 5 光照数据采集

Fig.5 Lighting data acquisition

征,研究这些特征与对应空间实测相对光照强度之间的映射关系,构建群体樱桃树冠层光照分布预测模型。

2.1 点云特征提取

2.1.1 点云分割与分层

为了提取樱桃树冠层点云数据中不同高度层对应的点云特征,需要对群体樱桃树三维点云数据进行点云分割与分层,如图 6 所示。通过点云分割,得到单株樱桃树冠层点云数据,如图 6a 所示。根据光

照强度数据采集实验中樱桃树冠层实际的空间划分方法,对单株樱桃树冠层点云数据,在竖直高度上进行点云分层,得到不同高度的点云数据,点云分层结果如图 6b 所示。

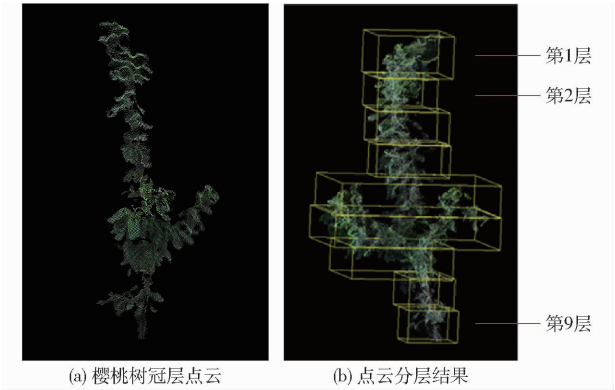


图 6 点云分割与分层

Fig. 6 Point cloud segmentation and layering

2.1.2 点云颜色特征提取

在 HSI 颜色空间中,点云颜色特征与光照强度之间有较高的相关性^[6]。通过 DK 彩色相机获取的群体樱桃树点云数据颜色信息,默认颜色空间为 RGB,需要将其转换到 HSI 颜色空间^[18],两者转换公式为

$$\begin{cases} H = \begin{cases} \theta & (G \geq B) \\ 2\pi - \theta & (G < B) \end{cases} \\ S = 1 - \frac{3\min(R, G, B)}{R + G + B} \\ I = \frac{R + G + B}{3} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\theta = \arccos \frac{R - G + R - B}{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)^{1/2}} \quad (2)$$

2.1.3 点云相对投影面积特征提取

凸包^[19]是指包含离散点集中所有点的最小凸

多边形,若点集的分布如图 7 所示,按照凸包算法的原理,仅能检测出 5 个凸包点,其围成的五边形面积远大于该点集的实际面积。为了更精确地计算出樱桃树点云投影面积,本文提出基于 Delaunay 三角化凹包算法的樱桃树点云投影面积计算方法,主要包括凹包边界提取和凹包面积计算两部分。

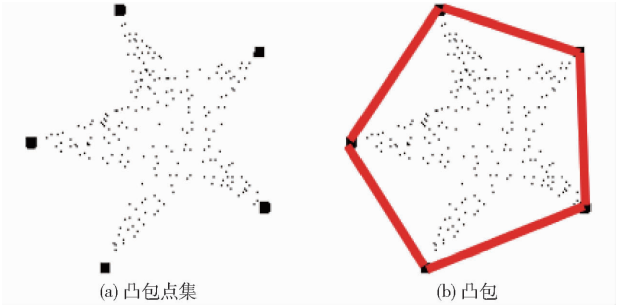


图 7 点云样例的凸包点集与其凸包

Fig. 7 Convex hull point set and its convex hull of point cloud samples

(1)凹包边界提取

对于某一个较不规则的离散点集,该点集的凸包是唯一确定的,但点集可能会对应不同的凹包,如图 8 所示。

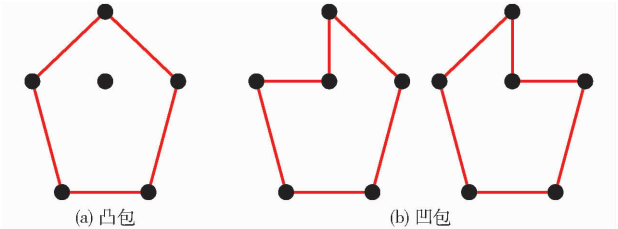


图 8 同一点集对应的凸包和不同凹包

Fig. 8 Convex hull and different concave hulls corresponding to the same point set

基于 Delaunay 三角化凹包边界提取过程如图 9 所示,Delaunay 三角网^[20-21]是指一组相连但互不重叠的三角形集合,点集 Delaunay 三角化结果如图 9a

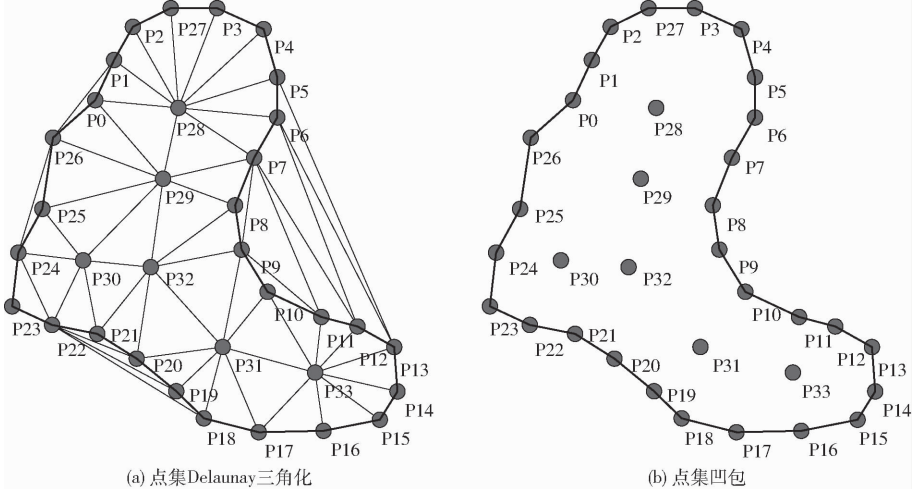


图 9 基于 Delaunay 三角化凹包边界提取过程

Fig. 9 Extraction process of concave envelope boundary based on Delaunay triangulation

所示,离散点集的凹包为该点集 Delaunay 三角网的子集,即从 Delaunay 三角网中删除一部分边,得到该点集的 1 个凹包边界,如图 9b 所示。

(2)凹包面积计算

已知向量 $\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{b}$,则向量积为

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = |\boldsymbol{a}| |\boldsymbol{b}| \sin \theta \tag{3}$$

式中 θ —— $\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{b}$ 之间的夹角

向量积的模 $|\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$ 等于以 $\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{b}$ 为邻边的平行四边形的面积,向量积的方向与向量 $\boldsymbol{a}$ 和 $\boldsymbol{b}$ 所在的平面垂直,遵守右手定则。根据向量积模的定义,三角形面积 $S_{\triangle ABC}$ 可表示为

$$S_{\triangle ABC} = |\boldsymbol{l}_{AB} \times \boldsymbol{l}_{AC}| / 2 \tag{4}$$

对凹包中三角形面积累加求和,可得到凹包面积,并将其作为点云投影面积特征。

樱桃树冠层点云数据中每层点云凹包边界提取过程,如图 10 所示。本文将樱桃树冠层点云数据中每层点云数据进行水平投影,投影结果如图 10a 所示。基于 Delaunay 三角化的凹包算法,提取出每层点云水平投影对应的凹包点集,如图 10b 所示,通过向量叉乘,计算其围成的多边形面积,即每层点云的投影面积。以樱桃树冠层点云数据的投影面积为基准,将每层点云数据的投影面积与基准投影面积的比值视为该层点云的相对值投影面积。樱桃树冠层点云数据中,每层点云的水平投影凹包点集个数及相对投影面积,如表 2 所示。

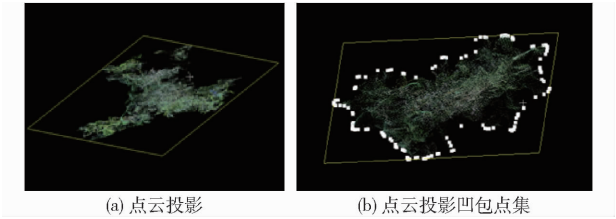


图 10 樱桃树冠层点云数据中每层点云凹包边界提取
Fig. 10 Extraction process of point cloud concave packets per layer in cherry canopy point cloud data

表 2 樱桃树冠层点云数据中每层点云水平投影的凹包点集个数及投影面积

Tab.2 Number of concave packet point sets and projected area per layer of horizontal projection of point cloud in cherry canopy layer point cloud data

层序号	凹包点集/个	面积/m ²
1	50	0.065 6
2	49	0.080 2
3	116	0.136 1
4	101	0.174 7
5	103	0.234 0
6	109	0.257 0
7	113	0.394 7
8	139	0.413 9
9	142	0.146 5

2.2 群体樱桃树冠层光照分布预测模型

2.2.1 数据预处理

以 1 组群体樱桃树为例,将对应的群体樱桃树点云数据分割为 4 棵单株樱桃树冠层点云数据,再对其纵向每 0.2 m 切分为 9 层,则 1 组群体樱桃树点云数据被分割为 36 层。计算每层点云的颜色特征和相对投影面积特征。根据光照强度采集实验,自上而下每 0.2 m 采集光照强度数据,同样共得到 36 个相对光强数据。随机选取 10 组群体樱桃树,采集其点云数据和相对光照强度数据,共得到 360 组数据。

由于樱桃树具有个体差异性,采集的樱桃树株高不唯一。当樱桃树株高小于 1.8 m,点云分层后得到 8 组点云,而光照强度数据采集是以 20 cm 为间隔设置 9 组,导致最上方的光照强度缺少对应的樱桃树点云数据,需要将其剔除。数据剔除后,剩余 347 组有效数据。

将数据导入 sklearn.cross_validation 模块,利用 train_test_split() 方法,将数据集按照 17:3 比例随机划分为训练集和测试集,并设置随机数种子,控制变量,以便对比预测结果。

2.2.2 光照预测模型建立

为寻找最优预测模型,选取多个回归算法预测群体樱桃树冠层光照分布规律。以累计投影面积和点云 HSI 颜色特征作为自变量,以相对光照强度值作为因变量,分别使用经典回归方法中的线性回归 (Linear regression, LR)、K 近邻 (K-nearest neighbor, KNN)、支持向量回归 (Support vector regression, SVR)^[22] 以及集成回归方法中的 AdaBoost 回归、渐进梯度回归树 (Gradient boost regression tree, GBRT)、随机森林 (Random forest, RF)^[23] 对数据进行回归分析。

3 结果与分析

在 Windows 10 环境下进行实验验证,集成开发环境为 Anaconda,开发框架为 Tensorflow。本文基于 Python 3.7 环境,调用 sklearn 库中各模型的包实现模型的构建与预测。实验使用 Python 中提供的科学计算库,主要包括 Numpy、Scipy、Pandas、Matplotlib 等,其中前 3 个主要用于数据预处理,Matplotlib 用于绘图。

3.1 各回归模型精度对比

使用五折交叉验证法对不同模型进行精度评价,选取决定系数和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。不同模型回归结果对比如图 11 所示,回归精度对比如表 3 所示。

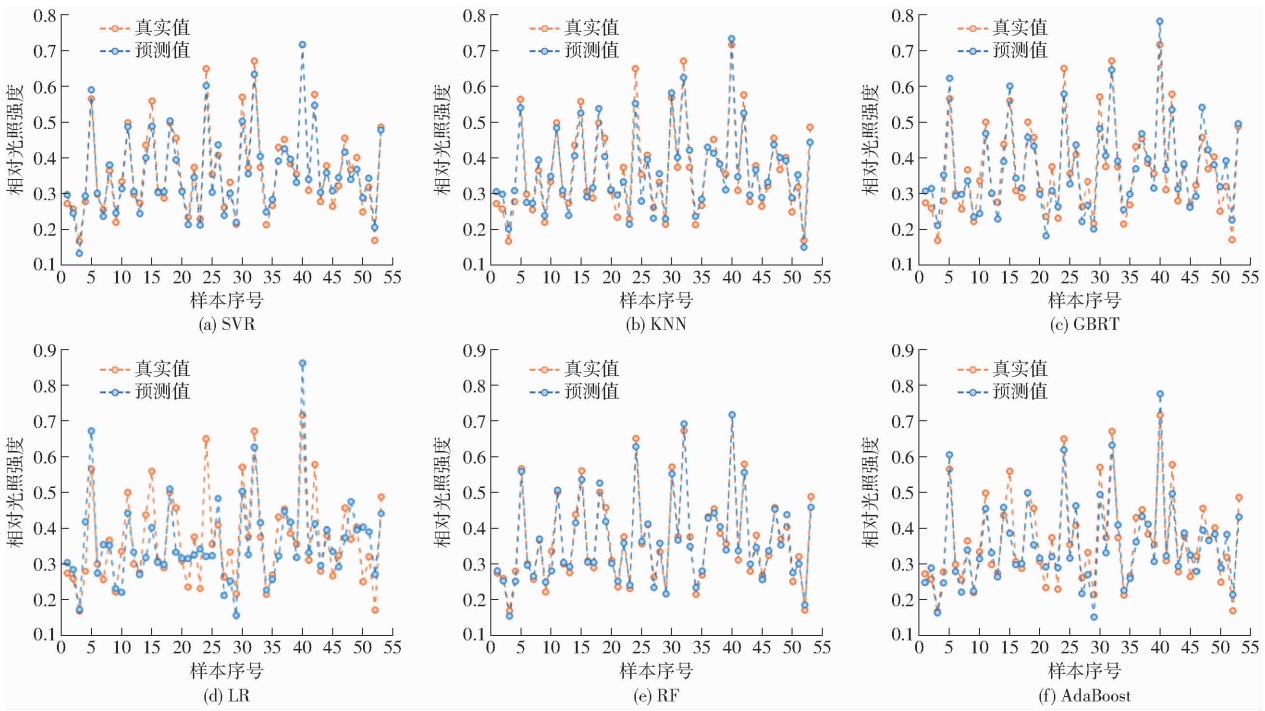


图 11 不同模型回归结果对比

Fig. 11 Comparison of regression results from different models

表 3 不同模型回归精度对比

Tab. 3 Regression accuracy comparison between different models

模型	R^2	RMSE
LR	0. 571	0. 093 1
KNN	0. 648	0. 078 7
SVR	0. 661	0. 075 7
AdaBoost	0. 749	0. 075 1
GBRT	0. 792	0. 074 4
RF	0. 885	0. 071 6

3.2 各回归模型精度结果分析

由表 3 可知,经典回归模型的回归精度均低于集成回归模型,其中随机森林模型的回归精度最优,线性回归模型最差。

KNN 模型与 SVR 模型误差均较大,主要因为这 2 种模型受邻域数据的影响较大,且针对群体樱桃树点云数据,通过点云分层来提取特征,一定程度上增加了邻域点云数据对预测结果的影响。

随机森林回归模型是一种应用广泛的集成学习方法,由多棵决策树组成,每棵决策树自助采样能够有效控制误差,对样本量较大的数据集处理效率高,对样本数据噪声不敏感,而且随机森林回归模型不需要做特征选择,对数据分布与数据类型的连续性和离散性没有特殊要求。针对本文点云颜色特征存

在一定的模糊性与复杂性的特点,随机森林预测模型具有较好的鲁棒性和适用性,适用于群体樱桃树冠层光照分布预测。

4 结论

- (1)搭建了群体樱桃树三维点云数据和冠层光照强度数据获取平台,使用 DK 相机前后左右 4 个角度,获取群体樱桃树三维点云数据,由于实验樱桃树为细纺锤形且株型较小,使用单个 DK 相机进行四站式扫描即可获得完整点云数据,后续若获取株型较大的果树,因遮挡而无法完全获取内部点云特征时,可考虑使用双 DK 相机。使用 HOBO 温度/光度(防水)数据记录器自上而下 3 层 9 站式获取冠层光照强度,并设置了空白对照组,保证了数据的真实性和完整性。
- (2)提出了基于 Delaunay 三角化凹包算法的点云投影面积计算方法,通过凹包边界点提取和向量叉乘,计算不同区域的点云投影面积,有效解决了点云投影面积难以快速精确计算的问题。
- (3)建立了以点云颜色特征和相对投影面积特征为输入,以实测相对光照强度为输出的随机森林模型。对比其他 5 种预测模型,随机森林模型回归结果 R^2 为 0. 885, RMSE 为 0. 071 6,可以较为准确地预测群体樱桃树冠层光照分布规律。

参 考 文 献

[1] 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[J]. *Acta Horticulturae*,2017(10):245–251.

[2] WILKIE J D, CONWAY J, GRIFFIN J, et al. Relationships between canopy size, light interception and productivity in conventional avocado planting systems[J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2018,94(4):1–7.

[3] 刘庆忠,朱东姿,王甲威,等. 山东省甜樱桃产业现状及发展展望[J]. *落叶果树*,2022,54(2):1–4,103.

[3] LIU Qingzhong, ZHU Dongzi, WANG Jiawei, et al. Development status and suggestions of sweet cherry industry in Shandong Province[J]. *Deciduous Fruits*,2022,54(2):1–4,103. (in Chinese)

[4] 章兰芬,李丙智,张社奇,等. 基于三维数字化仪的高纺锤形苹果树光截获率测定[J]. *北方园艺*,2012(7):9–12.

[4] ZHANG Lanfen, LI Bingzhi, ZHANG Sheqi, et al. Light interception measurement of apple treestrained to tall spindle shape based on three-dimensional digitizer[J]. *Northern Horticulture*,2012(7):9–12. (in Chinese)

[5] 朱荣胜,李帅,孙永哲,等. 作物三维重构技术研究现状及前景展望[J]. *智慧农业(中英文)*,2021,3(3):94–115.

[5] ZHU Rongsheng, LI Shuai, SUN Yongzhe, et al. Research advances and prospects of crop 3D reconstruction technology[J]. *Smart Agriculture*, 2021, 3(3): 94–115. (in Chinese)

[6] 马晓丹,郭彩玲,张雪,等. 基于三维点云颜色特征的苹果树冠层光照分布计算方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 263–268.

[6] MA Xiaodan, GUO Cailing, ZHANG Xue, et al. Calculation of light distribution of apple tree canopy based on color characteristics of 3D point cloud[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(6):263–268. (in Chinese)

[7] 郭彩玲,张伟洁,刘刚,等. 基于苹果树冠层计盒维数的光照分布预测[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 177–183.

[7] GUO Cailing, ZHANG Weijie, LIU Gang, et al. Illumination spatial distribution prediction method based on apple tree canopy box-counting dimension[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(16): 177–183. (in Chinese)

[8] 廖崴,郑立华,李民赞,等. 基于三维点云的苹果树冠层光照分布模型研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(12): 156–162.

[8] LIAO Wei, ZHENG Lihua, LI Minzan, et al. Canopy light distribution modeling for apple trees based on the 3D point cloud[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(12): 156–162. (in Chinese)

[9] 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]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 214–222.

[9] SHI Yi, GENG Nan, HU Shaojun, et al. Illumination distribution model of apple tree canopy based on random forest regression algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 214–222. (in Chinese)

[10] 梁树乐,于春开,李红娟,等. 设施甜樱桃限根密植促成栽培技术[J]. *中国果树*,2022(3):81–84,94.

[10] LIANG Shule, YU Chunkai, LI Hongjuan, et al. Facility sweet cherry limited root density cultivation technology[J]. *China Fruits*, 2022(3):81–84,94. (in Chinese)

[11] 张德学,秦喜田,刘学峰,等. 国内外果园枝条修剪研究进程与配套设备[J]. *中国果树*,2021(2):6–12.

[11] ZHANG Dexue, QIN Xitian, LIU Xuefeng, et al. Research processes and equipment for orchard pruning at home and abroad[J]. *China Fruits*, 2021(2):6–12. (in Chinese)

[12] 马保建,鄢金山,王乐,等. 基于骨架点的矮化密植枣树三维点云自动配准[J]. *农业机械学报*,2021,52(9):24–32.

[12] MA Baojian, YAN Jinshan, WANG Le, et al. Three-dimension point cloud automatic registration for dwarf and dense planted jujube tree based on skeleton points[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(9):24–32. (in Chinese)

[13] 刘璐. 多视图三维重建与点云轮廓特征提取技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[13] LIU Lu. Research and implementation on multi-view reconstruction and point cloud contour feature extraction technology[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2019. (in Chinese)

[14] RADU B R, ZOLTAN C M, NICO B, et al. Towards 3D point cloud based object maps for household environments[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(11): 927–941.

[15] 陆健强,兰玉彬,毋志云,等. 植物三维建模 ICP 点云配准优化[J]. *农业工程学报*,2022,38(2):183–191.

[15] LU Jianqiang, LAN Yubin, WU Zhiyun, et al. Optimization of ICP point cloud registration in plants 3D modeling[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(2): 183–191. (in Chinese)

[16] 李修华,魏鹏,何嘉西,等. 基于 Kinect V3 深度传感器的田间植株点云配准方法[J]. *农业工程学报*,2021,37(21):45–52.

[16] LI Xiuhua, WEI Peng, HE Jiayi, et al. Field plant point cloud registration method based on Kinect V3 depth sensors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(21):45–52. (in Chinese)

[17] 刘伟峰,谢永杰,陈若望,等. 天顶亮度与太阳高度角关系的观测[J]. *光电工程*,2012,39(7):49–54.

[17] LIU Weifeng, XIE Yongjie, CHEN Ruowang, et al. Observation of relationship between zenith luminance and sun high angle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(7):49–54. (in Chinese)

[18] 杨栩,朱大明,杨润书,等. 匹配点云结合 HSI 色彩分量的无人机 RGB 影像信息提取方法[J]. *农业工程学报*,2021,37(22):295–301.

[18] YANG Xu, ZHU Daming, YANG Runshu, et al. Method for extracting UAV RGB image information based on matching point cloud and HSI color component[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(22): 295–301. (in Chinese)

[19] 蒲朝旭,杨武年,林志鹏. 快速生成等值线的凹包算法[J]. *测绘科学*,2019,44(9):13–18.

[19] PU Chaoxu, YANG Wunian, LIN Zhipeng. The fast contour generation algorithm use concave hull[J]. *Science of Surveying and Mapping*,2019,44(9):13–18. (in Chinese)

[20] 孟迪. 点集图形重建的算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[21] 青文星,陈伟. Delaunay 三角网生成的改进算法[J]. *计算机科学*,2019,46(增刊 1):226–229.

[22] 张燕,田国英,杨英茹,等. 基于 SVM 的设施番茄早疫病在线识别方法研究[J]. *农业机械学报*,2021,52(增刊):125–133,206.

[22] ZHANG Yan, TIAN Guoying, YANG Yingru, et al. Online detection method of tomato early blight disease based on SVM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(Supp.):125–133,206. (in Chinese)

[23] 王来刚,郑国清,郭燕,等. 融合多源时空数据的冬小麦产量预测模型研究[J]. *农业机械学报*,2022,53(1):198–204,458.

[23] WANG Laigang, ZHENG Guoqing, GUO Yan, et al. Prediction of winter wheat yield based on fusing multi-source spatio-temporal data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2022,53(1):198–204,458. (in Chinese)