

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.024

基于几何模型的绿萝叶片外部表型参数三维估测

徐焕良^{1,2} 马仕航¹ 王浩云^{1,2} 胡华东¹ 殷佳来¹ 车建华¹

(1.南京农业大学信息科技学院,南京 210095; 2.南京农业大学农业工程博士后流动站,南京 210031)

摘要:为快速高效获取叶类植物叶片的外部表型参数、掌握植株生长状况,以绿萝叶片为研究对象,提出一种基于几何模型的叶长、叶宽与叶面积的三维估测方法。利用微软 Kinect V2 相机,自 80 cm 高度垂直位姿获取绿萝叶片局部点云,并进行直通滤波去噪与包围盒精简等预处理,测量得到点云外形参数,输入预先建立的 SAE 网络分类预测得到几何模型参数,并基于曲面参数方程建立叶片几何模型。采用粒子群优化算法计算几何模型离散点云和局部点云间的空间距离,进行空间匹配,利用遗传算法求解最优匹配模型的内部模型参数,输出最优匹配模型的叶长、叶宽与叶面积作为估测结果。实验共采集 150 片绿萝叶片的局部点云数据,将估测结果和真实值进行数学统计与线性回归分析,得出叶长、叶宽与叶面积估测的平均误差分别为 0.46 cm、0.41 cm 和 3.42 cm²,叶长估测 R^2 和 RMSE 分别为 0.88 和 0.52 cm,叶宽 R^2 和 RMSE 分别为 0.88 和 0.52 cm,叶面积 R^2 和 RMSE 分别为 0.95 和 3.60 cm²。实验表明,该方法对于绿萝叶片外形参数的估测效果较好,具有较高实用价值。

关键词:绿萝叶片;表型参数;三维点云;几何模型

中图分类号: TP391; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0220-09

OSID:



Three-dimensional Estimation of Money Plant Leaf External Phenotypic Parameters Based on Geometric Model

XU Huanliang^{1,2} MA Shihang¹ WANG Haoyun^{1,2} HU Huadong¹ YIN Jialai¹ CHE Jianhua¹

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Postdoctoral Mobile Station of Agricultural Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In order to obtain the external phenotypic parameters of the leaves and grasp the growth status of the plants quickly and efficiently, a three-dimensional estimation method of leaf length, leaf width and leaf area was proposed based on a geometric model by using the leaves of money plant. The Microsoft Kinect V2 camera was used to obtain the local point cloud of the leaf from the 80 cm height vertical pose and perform preprocessing such as pass-through filtering, denoising and simplification of the bounding box. The shape parameters of the point cloud were measured, and the pre-established SAE network classification prediction was used to obtain the geometric model parameters. The geometric model of the blade was established based on the surface parameter equation. The particle swarm optimization algorithm was used to calculate the spatial distance between the discrete point cloud and the local point cloud of the geometric model for spatial matching. The genetic algorithm was used to solve the internal model parameters of the optimal matching model, and the leaf length, leaf width and leaf area of the optimal matching model were output, were used as the estimation result. A total of 150 point cloud data were collected from the experiments. The estimated results and real values were analyzed by mathematical statistics and linear regression analysis. The average errors of the estimated leaf length, leaf width, and leaf area were 0.46 cm and 0.41 cm and 3.42 cm², respectively. The R^2 and RMSE of estimated leaf length were 0.88 and 0.52 cm, the R^2 and RMSE of leaf width were 0.88 and 0.52 cm, and the R^2 and RMSE of leaf area were 0.95 and 3.60 cm², respectively. It can be known from the experimental results

收稿日期: 2020-03-02 修回日期: 2020-03-31

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910307072Z)、中央高校基本科研业务费专项基金项目(KYZ201914、KJQN201732)、国家自然科学基金项目(31601545)和江苏省重点研发计划项目(BE2016803)

作者简介: 徐焕良(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业物联网关键技术研究,E-mail: huanliangxu@njau.edu.cn

通信作者: 车建华(1979—),男,讲师,博士,主要从事食品安全电子追溯、智慧农业和大数据研究,E-mail: chejianhua@njau.edu.cn

that this method had good estimation effect on the shape parameters of money plant leaves, and it had high practical value.

Key words: money plant leaf; phenotype parameter; 3D point cloud; geometric model

0 引言

对于大部分叶类植物,叶片对植株的生长生理活动具有决定性的影响。叶片是植物蒸腾、光合作用与呼吸作用的主要器官,是植物进行生理生化活动的主要场所^[1]。叶片的外部表型参数如叶长、叶宽与叶面积,对光能吸收、水分蒸腾、有机物积累、收获量及对植物的生理活动等均有显著影响^[1],能直观反映植物所处的生长周期。因此,叶类植物外部表型参数的测算对了解植物的生长状态极为重要。传统的手工测量及二维图像测量方法^[2-4]都是接触式的,需要叶片离体,对植物造成损害,同时操作复杂和效率低。

近年来,随着计算机技术的发展,基于三维点云的三维建模和三维测量技术逐渐完善,农作物的三维重建技术逐渐成熟^[5-7],为农作物外形测量提供了新方法。文献[8]利用飞行时间(TOF)深度相机获取玉米植株点云数据,重建三维模型并实现可视化,通过分割茎叶点云来提取玉米的茎高、叶长、叶宽、叶倾角和叶面积等参数,但受相机硬件条件限制,提取参数精度有待提高。文献[9]利用手持式三维扫描仪多方位获取了大麦植株的点云数据,进行预处理与三维重建后,提取了大麦植株高度、茎高和叶面积等参数,实现了对大麦生长过程的检测。在此基础上,文献[10]采用特征直方图分割植物器官点云,实现了基于点云对植物单个器官表型参数的提取,如葡萄叶片的叶面积与葡萄茎的茎高,但依然需要使用三维数字化仪进行多角度获取。文献[11]采用三维数字化仪对玉米植株进行扫描与配准重建,对重建后的三维模型提取植株骨架,通过识别各部分植株实现对株高、叶长、叶宽、叶倾角等参数的测量,对叶长、叶宽与叶倾角估测的 RMSE 均值分别为 3.44 cm、0.80 cm 与 3.41°,具有较高的精度与一致性,但需要人工进行单株植物的多角度数据采集,成本较高。文献[12]采用运动结构恢复算法将智能手机获取的多角度葡萄植株可见光图像转换为三维点云,在分割出单片叶片数据后,网格化计算叶面积,与扫描叶片法测定值的平均误差达到 4.67%,降低了操作成本,但该方法依然需要通过获取多角度的可见光图像来获得完整的植株点云。

目前,农作物植株的三维测量技术已经比较成熟,大多为非接触性测量方法,即无需损伤植株就可

以准确提取株高、叶长、叶宽、叶面积与叶倾角等外部表型参数,并达到了一定的估测精度。但是应用三维测量技术往往需要从多个角度对单个植株进行数据采集,需要进行多次相机标定,并在数据处理阶段进行点云配准拼接,才能得出完整的点云数据。在实际应用中,改变植株位置或相机位置均较为麻烦,耗费人力和物力,并且点云配准与拼接的部分仍亟需快速精准的方法。针对以上问题,本文以绿萝为研究对象,采用 Kinect 相机进行单一角度拍摄,获取绿萝叶片同一高度下的局部点云,对点云数据进行处理后,与预先建立的绿萝叶片几何模型进行匹配寻优,提出一种根据局部点云匹配几何模型来获取绿萝叶长、叶宽与叶面积的方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验选取生长状态良好的长藤大叶绿萝 10 盆,植株冠层直径在 30 ~ 35 cm,冠层高度 10 ~ 15 cm。实验随机采集不同位置的叶片 150 片,作为研究对象,采集其叶长、叶宽、叶面积 3 个叶片外部表型参数信息。

1.2 实验数据采集

实验共分为 3 部分,其中基于几何模型方法所需的局部点云数据采集与基于点云重构方法对照实验所需的多角度点云数据采集需要获取的数据为同一高度下不同角度的点云数据,同时采集属于无损检测。为了对 2 种方法的测量误差进行计算,需要对叶片外部表型参数的真实值进行测定,属于有损检测,获取叶片叶长、叶宽与叶高的真实值。

1.2.1 叶片外部表型参数的真实值测定

对于待测叶片,将叶片紧贴叶基剪下,平铺贴于 A4 尺寸(210 mm × 297 mm)白纸上,借助游标卡尺测量叶长与叶宽,测量精度为 0.01 mm。实验采用 Kinect V2 相机从 80 cm 高度获取叶片彩色图像并进行平面标定与校正,而后采用图像分割提取叶片区域与 A4 纸区域的二值图像,进行像素点统计,按照与 A4 纸面积的比例来求取叶面积实际测量数据。

1.2.2 点云数据采集与处理

为便于后续结果对照,同时对局部点云数据与多角度点云数据进行采集。实验采用微软公司的 Kinect V2 相机借助三脚架、水准仪和伸缩横臂从垂

直立姿对绿萝植株进行拍摄,获取绿萝植株的点云数据。按照误差分析结果(图1a),拍摄高度固定于80 cm,拍摄过程中始终保持相机镜头中轴线垂直于实验台,将绿萝植株放置于相机正下方,变换任意角度,每次对绿萝冠层表面进行一次拍摄,获取点云数据,然后进行实际测量并剪去表面叶片,进行下一次拍摄。拍摄过程如图1b所示。

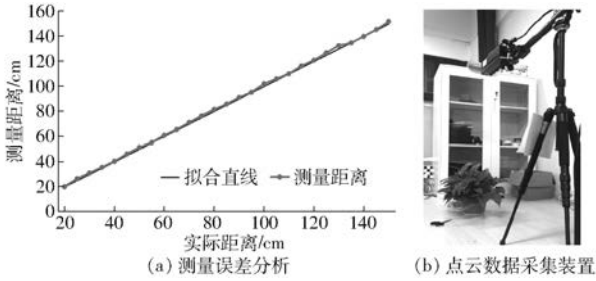


图1 点云数据采集

Fig.1 Point cloud data collection

数据获取方式采用微软发布的 Kinect for Windows SDK 2.0,使用其中的 Kinect Fusion Explorer 进行点云数据采集,采取颜色纹理贴图的方式,保存 ply 格式的点云数据文件,开发软件使用 Matlab R2016a,使用 Matlab 工具箱中提供的 calibration 工具对数据进行标定,获取镜头畸变参数,得到校正矩阵。

Kinect V2 相机获取到的初始点云为包含实验台背景的绿萝冠层表面的点云数据。点云数据包含空间点的位置坐标信息和相对应的 RGB 颜色信息,点云数据的三维坐标系原点为 Kinect 深度摄像头所在位置,长度单位为 m,精度为 0.001 m。

(1) 基于几何模型方法的点云数据预处理

取一个角度下的点云数据进行处理。为提高后续处理效率,采用直通滤波^[13]的方法去除背景数据与噪声点,只保留植株冠层部分数据,如图2a所示。单片叶片点云分割采用手动标注结合 K-means 算法,将冠层表面可见的 k 个叶片点云进行空间聚类^[14-15],对应叶片编号单独保存。分割之后采取包

围盒精简算法^[16]对叶片局部点云进行精简压缩。处理后的单个叶片局部点云数据如图2c所示。

(2) 基于点云重构方法的点云数据处理

对照实验设计按照目前最常见的点云配准与网格重构的方法^[17]进行。对同一高度下该冠层多个角度获取的点云数据进行直通滤波处理,利用最近点迭代法(Iterative closest point, ICP)^[17]算法对不同角度的冠层点云进行配准拼接。单片叶片点云的分割与精简同样采用手动标注结合 K-means 聚类算法和包围盒精简算法的方式。经过分割与精简后的单个叶片点云有时会存在区域数据点缺失的情况,利用最近邻点插值法^[18]对孔洞进行修补,获得完整的单片叶片点云。在估测环节采用生成 OBB (Oriented bounding box) 包围盒^[17]来获取叶片的叶长与叶宽,采用贪婪投影三角网格化重构点云^[17]得出叶面积。

1.3 叶片几何模型的构建与模型参数反演

1.3.1 基于曲面参数方程的叶片几何模型构建

根据叶片的造型研究^[19-20]可知,叶片外形由叶形、叶尖、叶基和叶缘的边界轮廓形状组成,绿萝叶片呈上窄下宽的卵圆形,叶尖形状为渐狭的急尖,叶基为钝圆形,少数为心形,叶缘为平滑全缘,无锯齿或波浪。叶片自然生长中会在主脉方向与其垂直方向自然弯曲。由于叶片厚度较小,在模拟过程中忽略不计,故采用参数曲面方程 $Q(u, v)$ 构建一个长方形平面,然后在 X 、 Y 、 Z 方向上添加干扰函数来模拟叶片的外形与姿态。

$$\begin{cases} x_Q = bu \\ y_Q = hv \\ z_Q = 0 \end{cases} \quad (-0.5 \leq u \leq 0.5, 0 \leq v \leq 1) \quad (1)$$

式中 x_Q —— X 方向上的参数方程

y_Q —— Y 方向上的参数方程

z_Q —— Z 方向上的参数方程

b ——宽度系数 h ——长度系数

u 、 v ——自变量参数

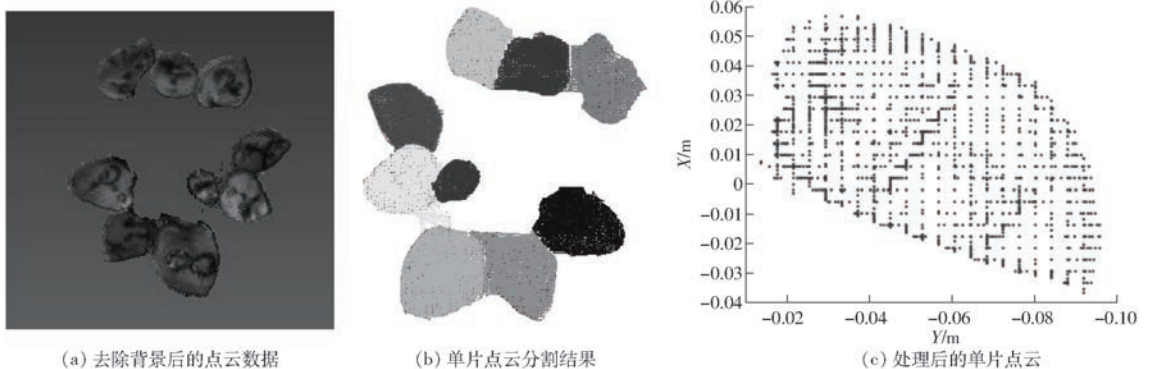


图2 点云数据分割与处理

Fig.2 Segmentation and processing of point cloud data

形成长为 h 、宽为 b 的初始矩形平面。

为叶片添加 X 、 Y 方向上的干扰函数, 包括 1 个 X 方向上的叶形干扰函数 t_{x1} 与 3 个 Y 方向上的叶基、叶尖干扰函数 t_{y1} 、 t_{y2} 、 t_{y3} 。

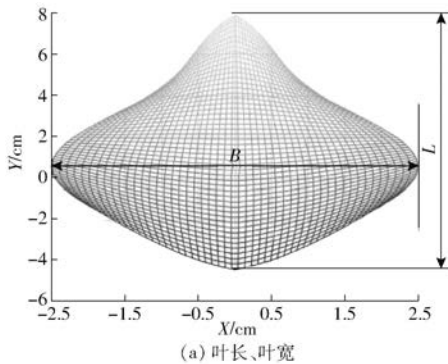
$$\begin{cases} t_{x1} = 2ua_x \sin(\pi v + d_y) \\ t_{y1} = va_t \sin(\pi(u + 0.5)) - (1 - v)a_b \sin(\pi(u + 0.5)) \\ t_{y2} = v(bu_t - \text{abs}(bu))u_t \\ t_{y3} = -(1 - v)(bu_t - \text{abs}(bu))u_b \end{cases} \quad (2)$$

式中 abs ——绝对值函数

a_x ——叶形变形指数, 对叶片的外形影响主要是叶宽

d_y ——比例造型指数, 影响叶片最宽点位置

a_t ——叶尖变形指数, 控制叶尖部分的长度变化, 对叶长产生影响



(a) 叶长、叶宽

a_b ——叶基变形指数, 控制叶基部分的长度变化, 对叶长产生影响

u_t ——叶尖造型指数, 控制叶尖部分的宽高比, 对叶长产生影响

u_b ——叶基造型指数, 控制叶基部分的宽高比, 对叶长产生影响

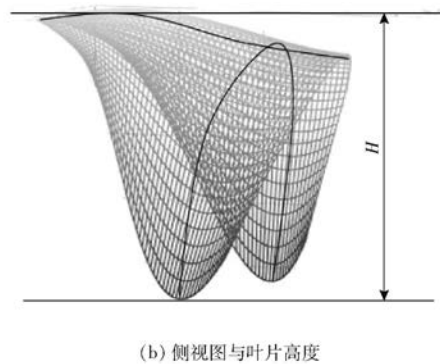
得出最终曲面参数方程

$$\begin{cases} x_Q = bu + t_{x1} \\ y_Q = hv + t_{y1} + t_{y2} + t_{y3} \\ z_Q = x_b b \sin(0.25x_Q \pi / b + \pi / 2) + y_b \sin(0.25\pi y_Q / h) \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_b ——叶片沿 X 方向在 Z 轴的弯曲幅度

y_b ——叶片沿 Y 方向在 Z 轴的弯曲幅度

根据该方程构建的绿萝叶片几何模型如图 3 所示。



(b) 侧视图与叶片高度

图 3 叶片几何模型及外部表型参数

Fig. 3 Leaf geometry model and external phenotypic parameters

以上分析可知, 在绿萝参数曲面方程中, 包含 h 、 b 、 u_t 、 u_b 、 a_x 、 d_y 、 a_t 、 a_b 、 x_b 、 y_b 10 个内部模型参数。这 10 个内部模型参数影响着几何模型的 L 、 B 、 H 、 S 4 个外部表型参数, 将模型 Y 方向上的最高点与最低点间的差值作为模型的叶长 (记为 L); 将模型 X 方向上的最高点与最低点间的差值作为叶宽 (记为 B); 将模型 Z 方向上的最高点与最低点间的差值作为叶片高度 (记为 H); 并对曲面进行插值, 计算出曲面的表面积作为叶面积 (记为 S)。各外形指标示意图如图 3 所示。

对 10 个几何模型参数进行多次调参, 测量几何模型的外形参数, 判断是否落在实测数据的统计值范围内, 确定各参数的取值范围; 对 10 个内部参数和对应的 4 个外部表型参数进行 Morris 敏感性分析, 根据模型参数变化幅度对外形参数的影响程度确定各参数步长, 如表 1 所示。根据这些参数组合得 7 500 000 组参数方程, 对其中的畸形模型进行排除之后, 得 15 000 组几何模型数据, 作为几何模型参数反演的训练集与遗传算法遍历的训练数据集。

表 1 模型参数取值范围、取值步长及反演精度

Tab. 1 Model parameter value range, value step and inversion accuracy

参数	取值范围	步长	可能取值个数	反演预测精度/%
长度系数	1 ~ 5	1	5	86
宽度系数	1 ~ 5	1	5	92
叶尖造型指数	0 ~ 1.5	0.5	4	76
叶基造型指数	0 ~ 1.5	0.5	4	75
叶形变形指数	0 ~ 5	1	6	96
比例造型指数	0 ~ 1	0.25	5	66
叶尖变形指数	0 ~ 10	2.5	5	90
叶基变形指数	0 ~ 10	2.5	5	97
X 方向弯曲幅度	0 ~ 2	0.5	5	72
Y 方向弯曲幅度	0 ~ 2	0.5	5	90

1.3.2 叶片外部表型参数向几何模型内部模型参数的反演

由于几何模型的内部模型参数个数多且步长较小, 模型库范围过大, 对于后续几何模型匹配算法的精度和效率造成负面影响, 所以实验采取稀疏自编码 (Sparse AutoEncoder, SAE) 神经网络来对内部模

型参数进行预测,作为遗传算法的起点,缩小遍历范围。SAE神经网络是一种无监督的学习方法,它使用反向传播算法来训练权重,计算出的权重可以使结果更快地收敛,实现数据的降维^[21]。

实验以5000条模型外部表型参数数据作为训练集,以4组外部表型参数作为输入,将10个内部模型参数逐一作为输出变量进行反演,SAE网络级联2个隐含层,层内节点数分别为4、3。以100条外部表型参数做测试,得出每个内部模型参数的预测精度如表1所示。

1.4 叶片外部表型参数的估测

实验目的在于使用固定角度的深度相机进行一次拍摄即能对外部表型参数进行估测,所采集到的点云信息并不完整,无法获取准确的外部表型参数。实验采取将局部点云与预先建立的绿萝叶片几何模型库中的模型进行匹配,寻找一个与局部点云外形姿态最为接近的叶片几何模型,输出其外部表型参数作为估测得到的叶片外部表型参数。为了寻找到这个最优匹配模型,需要对几何模型进行空间变换与模型参数寻优。

1.4.1 局部点云与几何模型离散点集间的空间匹配

点云数据在空间三维坐标系中以 X 、 Y 、 Z 3个坐标轴上的位置信息来表示,在几何模型离散点集向叶片局部点云进行空间匹配的过程中,点集的空间变换系数包括 X 、 Y 、 Z 轴上的平移距离 t_x 、 t_y 、 t_z 和围绕 X 、 Y 、 Z 坐标轴的旋转角 α 、 β 、 γ ,即代表粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法^[22]中问题解具有6个自由度。设输入的绿萝叶片局部点云为点集 $P = \{m_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$,几何模型离散点集为 $Q = \{n_j\} (j = 1, 2, \dots, k)$ 。采用欧氏空间变换匹配两点集之间的空间,对几何模型离散点集 Q 乘上一个欧氏空间变换矩阵得到新位置下的点集 $Q' = \{n'_j\}$,计算点与点之间的欧氏距离和作为模型之间的匹配度 F ,设定种群粒子数 $N = 20$,最大迭代次数为300。迭代寻找匹配度最佳的点云位置,实现点集 P 与点集 Q 之间的距离最小^[23-24]。空间变换公式为^[25]

$$Q'(n'_j) = H[m_i; 1] \quad (4)$$

其中

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = [t_x \quad t_y \quad t_z] \quad (7)$$

式中 H ——欧氏变换矩阵

\mathbf{R} ——正交旋转矩阵

\mathbf{T} ——平移矩阵

匹配度计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (8)$$

式中 d_i —— m_i 与 n'_j 间的距离

更新粒子的速度 v_r 和位置 x_r ,进行迭代

$$\begin{cases} v_r \leftarrow v_r + c_1 \text{rand}() (p_{\text{Best}} - x_r) + c_2 \text{rand}() (g_{\text{Best}} - x_r) \\ x_r \leftarrow x_r + v_r \end{cases} \quad (9)$$

式中 c_1 ——自我学习因子,取1.8

c_2 ——群体学习因子,取2.0

$\text{rand}()$ ——生成 $[0, 1]$ 随机数的函数

p_{Best} ——局部最优解

g_{Best} ——全局最优解

根据式(9),对几何模型离散点集进行距离与角度上的变换,得到与所输入的叶片局部点云最贴合的空间位置,并输出相应的点云位置和最小距离和。

1.4.2 基于遗传算法的叶片几何模型参数寻优

利用粒子群优化算法,实现叶片局部点云和几何模型离散点集的空间匹配,并得到衡量空间匹配效果的指标最小距离和 F 。由于叶片几何模型具有 h 、 b 、 u_t 、 u_b 、 a_x 、 d_y 、 a_t 、 a_b 、 x_b 、 y_b 10个内部模型参数,这10个内部模型参数分别影响着 L 、 B 、 H 、 S 4个外部表型参数中的1个或多个,这与生物学中基因与个体表现型的关系十分类似。所以采取遗传算法(Genetic algorithm, GA)^[26]来寻找匹配效果最优的内部模型参数组合。对局部点云 P 生成OBB包围盒得到叶长、叶宽和叶高,输入预先训练好的SAE网络,反演得到几何模型10个内部模型参数。设定种群规模15,最大迭代次数5,在反演得到的10个内部模型参数周围小范围内,采取实数编码的方式进行编码,采取轮盘赌法进行选择,交叉概率为0.75,变异概率为0.05。采用PSO算法计算其与局部点云间的匹配度得到与叶片局部点云匹配效果最优的几何模型,迭代后输出匹配度最佳的个体解码后的内部模型参数和对应外部表型参数作为估测结果。

以上为结合内部模型参数反演,PSO算法与遗传算法的绿萝叶片局部点云估测叶片外部表型参数的方法,总流程图如图4所示。

2 实验结果与分析

2.1 叶片外部表型参数实际测量结果分布

选取150片长藤大叶绿萝叶片作为实验样本,

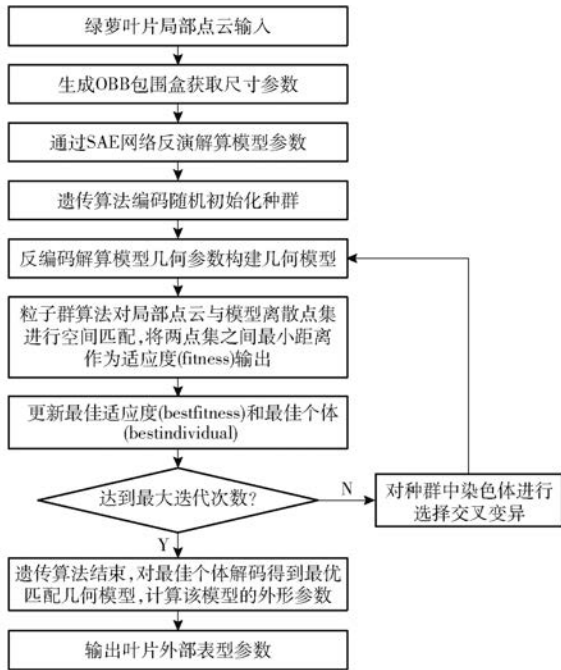


图 4 基于几何模型的绿萝叶片外部表型参数三维估测流程图

Fig. 4 Flow chart of a three-dimensional estimation method for external phenotypic parameters of money plant leaves based on geometric model

利用游标卡尺和 Kinect 彩色相机对叶片的叶长、叶宽、叶面积进行测量, 由于盆栽绿萝由若干株绿萝植株组成, 各株绿萝均处于不同的生长时期。表 2 为绿萝叶片外部表型参数实测结果, 经过统计可知, 绿萝叶片叶长与叶宽分布范围分别为 6.86 ~ 13.93 cm 与 4.03 ~ 10.10 cm, 叶面积为 19.67 ~ 96.70 cm²。处于幼叶期、成长期与成熟期的绿萝叶片样本数量分别为 23、97、30 片, 绿萝叶片的生长周期主要通过叶长、叶宽所处大小范围与叶片颜色来综合判断^[27], 由实测环节观察结果, 幼叶期叶长范围为 5 ~ 7 cm, 叶宽范围为 3 ~ 4 cm; 成长期叶片叶长范围为 8 ~ 10 cm, 叶宽范围为 5 ~ 6 cm; 成熟期叶片叶长范围为 10 ~ 13 cm, 叶宽范围 7 ~ 10 cm。总体来看样本数据分布范围较广, 覆盖绿萝的各生长阶段, 避免样本单一的状况出现, 说明实验具有一定的稳定

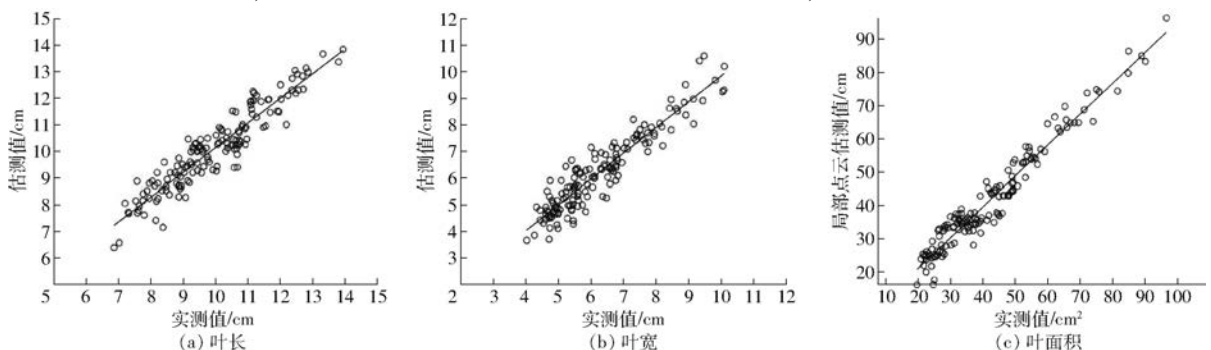


图 5 基于几何模型的绿萝叶片外部表型参数估测结果

Fig. 5 Estimation results of external phenotypic parameters of money plant leaves based on geometric models

表 2 绿萝叶片实测参数

统计参数	外部表型参数		
	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
平均值	9.94	6.31	42.58
最大值	13.93	10.10	96.70
最小值	6.86	4.03	19.67

性和普适性。

2.2 基于几何模型的叶片外部表型参数估测

实验采取 150 片绿萝叶片在 80 cm 高度下以垂直位姿获得的 150 组点云数据作为输入, 根据所提出的估测方法得到相对应的 150 组外部表型参数 (绿萝叶片叶长 L 、叶宽 B 、叶面积 S) 的估测结果, 数据分布如表 3 所示。对这 150 组外部表型参数的估测结果与实测数据进行数学统计与线性回归分析, 分析算法估测精度。

表 3 基于几何模型的绿萝叶片估测误差

Tab. 3 Estimation error statistics of money plant leaves based on geometric model

统计参数	外部表型参数		
	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
误差平均值	0.46	0.41	3.42
误差最大值	1.31	1.24	17.41
误差最小值	0.01	0	0.05
估测准确度/%	95	94	92

如图 5 所示, 横轴为叶片外部表型参数的人工实测值, 纵轴为基于几何模型匹配的估测值, 红色圆圈表示对同一叶片的实测值和估测值的位置, 对其分布位置拟合一条直线, 所得 R^2 表示回归直线对观测值的拟合程度, 其最大值为 1, 值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越高, 估测的精确度与普适性越好; RMSE 为均方根误差, 反映真实值与估测值之间的偏差, 其值与数据本身的取值范围和数据量均有一定关系。

2.3 基于点云重构的叶片外部表型参数估测

作为对照, 对同一批绿萝叶片多角度局部点云

数据进行重构,生成 OBB 包围盒得出的外部表型参数估测值,并采用网格化计算叶面积估测数据,对估测结果进行对比统计分析,结果见表 4 与图 6。从估测流程来看,基于点云重构的方法不仅需要进行

点云的配准与孔洞修补,并且无法一次对叶长、叶宽和叶面积进行检测,需要对点云分别生成 OBB 包围盒与三角网格化,效率较低,并且容易受点云质量的影响。

表 4 基于几何模型的不同阶段绿萝叶片估测误差

Tab. 4 Statistics of estimation errors of money plant leaves at different stages based on geometric models

统计参数	幼叶期			成长期			成熟期		
	叶长	叶宽	叶面积	叶长	叶宽	叶面积	叶长	叶宽	叶面积
平均误差	0.50 cm	0.30 cm	2.73 cm ²	0.46 cm	0.43 cm	3.49 cm ²	0.45 cm	0.41 cm	3.59 cm ²
估测准确度/%	93	93	88	95	93	91	96	95	94
R ²	0.67	0.67	0.68	0.82	0.88	0.87	0.76	0.87	0.94
RMSE	0.53 cm	0.34 cm	3.69 cm ²	0.52 cm	0.33 cm	3.68 cm ²	0.49 cm	0.48 cm	3.54 cm ²

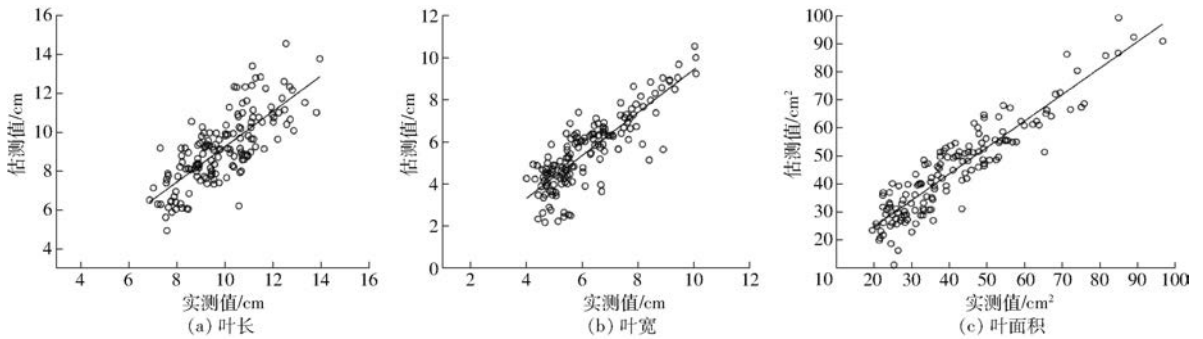


图 6 基于点云重构的绿萝叶片外部表型参数估测结果

Fig. 6 Estimation results of external phenotypic parameters of money plant leaves based on point cloud reconstruction

由表 3、4 可知,实验所用的 150 片叶片大小不一,形态各异,覆盖绿萝的每个生长周期,数据分布范围较广,该方法对于各叶片的估测中,叶长误差 0.01 ~ 1.31 cm,叶宽误差 0 ~ 1.24 cm,叶面积误差 0.05 ~ 17.41 cm²,对于不同生长阶段各外部表型参数估测的误差分布均匀,对于数量占比较大的成长期与成熟期叶片的参数估测效果较好,说明方法具有一定的普适性。

由图 5 可知,横轴为基于几何模型匹配的叶片外部表型的实测值,纵轴为各参数的估测值,其线性回归拟合 R² 均高于 0.85,表明拟合效果较好。RMSE 均在允许的偏差范围内,说明基于几何模型匹配方法对于叶片各外部表型参数估测的相关较为理想,具有实用性。

由图 6 与表 5 可看出,基于点云重构的估测方法对于叶长估测的误差 0.02 ~ 4.39 cm,叶宽估测的

表 5 基于点云重构的绿萝叶片估测误差

Tab. 5 Estimation error statistics of money plant leaves based on point cloud reconstruction

统计参数	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
误差平均值	1.16	0.84	5.81
误差最大值	4.39	3.27	20.24
误差最小值	0.02	0.01	0.03
估测准确度/%	89	87	86

误差 0.01 ~ 3.27 cm,叶面积估测效果较差,误差在 0.03 ~ 20.24 cm² 之间。图 6 横轴为重构叶片点云各外部表型参数的实测值,纵轴为估测值,其线性回归拟合 R² 均在 0.6 ~ 0.8 之间,略低于基于几何模型匹配的估测方法。但其 RMSE 也在允许的偏差范围内。

由表 6、7 可看出,3 个外形参数中,基于几何模型匹配的方法对于叶面积的估测效果最好,平均误差仅有 3.42 cm²,R² 为 0.95;对于叶长的估测效果最不理想,但其平均误差也仅有 0.46 cm,R² 为 0.88,均在允许范围内。总的来看,基于几何模型匹配方法对于绿萝叶片的外部表型参数的估测效果较好,有一定的稳定性与准确度。

结合表 6 与表 7,叶长、叶宽与叶面积参数基于几何模型匹配的方法估测的效果好于点云重构估测的结果,叶面积参数的估测明显优于点云重构估测

表 6 两种方法的绿萝叶片外部表型参数估测效果

Tab. 6 Estimation of external phenotypic parameters of money plant leaves

指标	基于几何模型估测		基于点云重构估测	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
叶长	0.88	0.52 cm	0.58	1.19 cm
叶宽	0.88	0.52 cm	0.71	0.94 cm
叶面积	0.95	3.60 cm ²	0.85	6.40 cm ²

表 7 两种方法绿萝叶片参数估测效果对比

Tab.7 Comparison statistics of effects of the two methods for estimating money plant leaf parameters

方法	指标	叶长	叶宽	叶面积
基于几何模型	平均误差	0.46 cm	0.41 cm	3.42 cm ²
	准确度/%	95	94	92
基于点云重构	平均误差	1.16 cm	0.84 cm	5.81 cm ²
	准确度/%	89	87	86

的效果,其中叶宽的估测结果对比点云重构估测优势不大。

3 结论

(1)采用曲面参数方程建立绿萝叶片外形仿真的几何模型库,利用深度学习实现外部表型参数向内部模型参数的反演,将反演结果输入遗传算法,结合粒子群优化算法,实现局部点云与几何模型

的空间匹配,遍历寻优找到与局部点云最贴合的几何模型。

(2)实验共采集 150 片绿萝叶片的局部点云数据,将估测结果和真实值进行数学统计与线性回归分析,得出叶长、叶宽与叶面积估测平均误差分别为 0.46 cm、0.41 cm 和 3.42 cm²,叶长估测 R^2 和 RMSE 分别为 0.88 和 0.52 cm,叶宽 R^2 和 RMSE 分别为 0.88 和 0.52 cm,叶面积 R^2 和 RMSE 分别为 0.95 和 3.60 cm²。估测结果的误差范围较小,且非常稳定,说明算法具有一定实用性。

(3)与目前主流的点云重构方法相比,基于几何模型匹配的估测方法的优势在于植物叶片不需离体,不需要多角度获取数据,叶片之间的遮挡关系影响小,数据处理步骤简洁,估测结果精确。本文为植物培育过程中对植物生长状态进行实时观测提供了方法。

参 考 文 献

- [1] 康宇. 植物叶片几何参数测量研究与应用[D]. 绵阳:西南科技大学,2016.
KANG Yu. Research and application of measurement of plant leaf geometric parameters[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,2016. (in Chinese)
- [2] 王永皎,张引,张三元. 基于图像处理的植物叶面积测量方法[J]. 计算机工程,2006,32(8):210-212.
WANG Yongjiao, ZHANG Yin, ZHANG Sanyuan. Method for measuring plant leaf area based on image processing [J]. Computer Engineering, 2006,32(8): 210-212. (in Chinese)
- [3] 张慧春,周宏平,郑加强,等. 植物表型平台与图像分析技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):1-17.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Research progress and prospect in plant phenotyping platform and image analysis technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(3): 1-17. http://www.j-csam.org/jc-sam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200301&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.001. (in Chinese)
- [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, et al. Determination of bell pepper leaf area based on support vector machine model and image processing technology [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(3): 237-241. (in Chinese)
- [5] 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. Research progress on three-dimensional reconstruction methods of agricultural 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)
- [6] 王勇健,温维亮,郭新宇,等. 基于点云数据的植物叶片三维重建[J]. 中国农业科技导报,2014,16(5):83-89.
WANG Yongjian, WEN Weiliang, GUO Xinyu, et al. Leaves and other plant-based point cloud data of three-dimensional reconstruction[J]. China Agricultural Science and Technology,2014,16(5): 83-89. (in Chinese)
- [7] 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 3D 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)
- [8] CHAIVIVATRAKUL S, TANG L, DAILEY M N, et al. Automatic morphological trait characterization for corn plants via 3D holographic reconstruction[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2014,109:109-123.
- [9] PAULUS S, SCHUMANN H, KUHLMANN H, et al. High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analyzing growth of cereal plants[J]. Biosystems Engineering,2014,121(18):1-11.
- [10] PAULUS S, DUPUIS J, RIEDEL S, et al. Automated analysis of barley organs using 3D laser scanning: an approach for high throughput phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12670-12686.
- [11] 温维亮,郭新宇,赵春江,等. 基于三维数字化的玉米株型参数提取方法研究[J]. 中国农业科学,2018,51(6):1034-1044.

- WEN Weiliang, GUO Xinyu, ZHAO Chunjiang, et al. Research on extraction method of maize plant type parameters based on 3D digitization [J]. *China Agricultural Science*, 2018, 51(6): 1034 – 1044. (in Chinese)
- [12] 苏宝峰, 刘易雪, 王琮, 等. 基于三维点云的叶面积估算方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 240 – 246, 254. SU Baofeng, LIU Yixue, WANG Cong, et al. A method for estimating leaf area based on 3D point clouds[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 240 – 246, 254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191227&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.027. (in Chinese)
- [13] LI L, MIAO Z, LIANG M. 3D reconstruction based on Kinect[C]//International Conference on Signal Processing. IEEE, 2015: 1247 – 1250.
- [14] 胡鹏程, 郭焱, 李保国, 等. 基于多视角立体视觉的植株三维重建与精度评估[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 209 – 214. HU Pengcheng, GUO Yan, LI Baoguo, et al. Three-dimensional reconstruction and accuracy evaluation of plants based on multi-view stereo vision [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(11): 209 – 214. (in Chinese)
- [15] RABBANI T, VAN DEN HEUVEL F, VOSSELMANN G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36(5): 248 – 253.
- [16] 麻卫峰, 周兴华, 徐文学, 等. 一种基于局部曲率特征的点云精简算法[J]. *测绘工程*, 2015(11): 13 – 16. MA Weifeng, ZHOU Xinghua, XU Wenxue, et al. A point cloud reduction algorithm based on local curvature features [J]. *Surveying and Mapping Engineering*, 2015(11): 13 – 16. (in Chinese)
- [17] 巨建肖. 基于 Kinect 传感器的植物叶片表型测量方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. JU Jianxiao. Study on phenotypic measurement of plant leaves based on Kinect sensor [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [18] 徐巍, 孙志鹏, 徐朋, 等. 基于 LIDAR 点云数据插值方法研究[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(3): 365 – 370. XU Wei, SUN Zhipeng, XU Peng, et al. Research on interpolation method of point cloud data based on LIDAR [J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 9(3): 365 – 370. (in Chinese)
- [19] 周南. 基于变形的三维植物叶片可视化造型研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2013. ZHOU Nan, Research on 3D plant leaf visual modeling based on deformation [D]. Nanchang: Donghua University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [20] 陆玲, 李丽华, 宋文琳, 等. 计算机图形学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 213 – 225.
- [21] 王鑫. 基于 SAE 和深度神经网络相结合的人脸特征提取与识别[J]. *移动通信*, 2018, 42(9): 32 – 37. WANG Xin. Face feature extraction and recognition based on the combination of SAE and deep neural networks [J]. *Mobile Communications*, 2018, 42(9): 32 – 37. (in Chinese)
- [22] 韩红桂, 卢薇, 乔俊飞. 一种基于种群多样性的粒子群优化算法设计及应用[J]. *信息与控制*, 2017, 46(6): 677 – 684. HAN Honggui, LU Wei, QIAO Junfei. Design and application of particle swarm optimization algorithm based on population diversity [J]. *Information and Control*, 2017, 46(6): 677 – 684. (in Chinese)
- [23] 陈岳坪, 靳龙, 李书平, 等. 自由曲面的高精度匹配技术研究[J]. *机床与液压*, 2014(15): 118 – 122. CHEN Yueping, JIN Long, LI Shuping, et al. Study on high precision matching technology of free-form surfaces [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014(15): 118 – 122. (in Chinese)
- [24] 刘孝龙. 自由曲面匹配技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. LIU Xiaolong. Research on free surface matching technology [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [25] 王华, 潘宝柱, 李拴柱. 空间坐标变换的矩阵法[J]. *石家庄理工职业学院学术研究*, 2014(3): 4 – 5. WANG Hua, PAN Baozhu, LI Shuanzhu. The matrix method of spatial coordinate transformation [J]. *Shijiazhuang Institute of Technology, Academic Research*, 2014(3): 4 – 5. (in Chinese)
- [26] 赵宜鹏, 孟磊, 彭承靖. 遗传算法原理与发展方向综述[J]. *科学技术创新*, 2010(13): 79 – 80. ZHAO Yipeng, MENG Lei, PENG Chengjing. Summary of the principles and development direction of genetic algorithms [J]. *Science and Technology Innovation*, 2010(13): 79 – 80. (in Chinese)
- [27] 桂克印. 不同光照处理对绿萝生长发育的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007. GUI Keyin. Study on the effect of different light treatments on the growth and development of *P. chinensis* [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [28] 陈梅, 施翔, 陈夏琳, 等. 珍珠玉绿萝在我国生长的表型鉴定[J]. *现代园艺*, 2019(20): 4 – 6. CHEN Mei, SHI Xiang, CHEN Xialin, et al. Phenotype identification of pearl jade and green chrysanthemum growing in China [J]. *Modern Horticulture*, 2019(20): 4 – 6. (in Chinese)