

王龙飞,彭军,杨乐,等.基于插值 NURBS 曲面的马铃薯叶片 3 维重建[J].江西师范大学学报(自然科学版),2023,47(6):637-644.

WANG Longfei,PENG Jun,YANG Le,et al. The 3D reconstruction of potato leaves based on interpolated NURBS surfaces[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Nature Science),2023,47(6):637-644.

文章编号:1000-5862(2023)-06-0637-08

## 基于插值 NURBS 曲面的马铃薯叶片 3 维重建

王龙飞,彭 军,杨 乐\*,李紫怡,刘欣宇

(江西农业大学计算机与信息工程学院,江西 南昌 330045)

**摘要:**随着计算机虚拟技术的迅速发展,虚拟作物技术已成为水稻、小麦、玉米等农作物生长发育状况研究的重要工具.现有关于农作物叶片 3 维重建的研究主要关注叶片的正面表面,而忽略了背面构造.该文针对农作物叶片 3 维重建问题,选取马铃薯叶片作为研究对象.首先,利用马铃薯叶片的实测数据和标记数据,结合非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面重构技术,通过控制点的反算方法及权重因子插值曲面算法,确定插值 NURBS 曲面的节点矢量、控制点、权重因子等相关参数;其次,采用插值 NURBS 曲线的方法对叶脉进行 3 维重建;最后,使用 VisMPL 和 VisVTK 对曲面进行颜色渲染和绘制,并引入曲面容器将叶正面、叶背面和叶柄的插值 NURBS 曲面进行融合.实验结果表明:基于传统方法,该方法通过增加叶片背面的构造,在重建马铃薯叶片的 3 维曲面模型上表现出色,有效实现了马铃薯叶片形态特征的 3 维重建,为马铃薯叶片研究提供技术支持.

**关键词:**虚拟作物技术;马铃薯叶片;非均匀有理 B 样条(NURBS);形态特征;3 维重建

**中图分类号:**TP 391.9;S 126 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.06.11

### 0 引言

近年来,在农业智慧化的进程中,将计算机视觉技术与农林作物生理学原理紧密融合,使得虚拟作物研究有了重大进展,农林作物形态结构及其功能的 3 维重建与可视化作为虚拟作物研究的关键技术,受到越来越多研究人员的关注<sup>[1-3]</sup>.叶片作为作物最重要的结构器官和功能器官之一,与作物的生长发育息息相关.

经过众多国内外学者的不断努力探索与研究,农作物叶片的几何形态 3 维可视化建模取得了很大进步. A. Marshall-Colon 等<sup>[4]</sup>利用多尺度模型构建了一个集成的多尺度建模平台,为指导整个植物建模工程提供工具,在虚拟作物研究方面取得重大进展,但在开发过程中仍然存在许多技术和社会挑战亟须解决. M. Invernizzi 等<sup>[5]</sup>基于智能手机的 3 维

植物扫描构建了 3 维功能结构植物模型(FSPM),以水稻为研究对象进行模型验证和参数化,并加入时间变化,结合贝塞尔参数重建叶片,为解决作物育种和管理策略有关优化冠层结构的问题提供了新的机会,但主要是对叶片曲率的动态模拟,仍需进一步分析叶片结构. V. J. Alarcon 等<sup>[6]</sup>使用计算机辅助几何设计(CSGD)算法并结合张量积插值器模型精确构建了棉花作物叶片和冠层模型,在促进作物冠层内生理功能和生物物理动态的研究上起到了极大的推动作用,但该模型未能较好地表现棉花的幼苗树冠. Miao Teng 等<sup>[7]</sup>以玉米叶片为研究对象,基于双向反射分布函数(BRDF)和双向透射率分布函数(BTDF)的外观模型,提出了一种通过控制生理参数来模拟作物叶片外观的实时 3 维建模和可视化方法,在玉米叶片的真实感上达到满意的展示效果.唐子宗等<sup>[8]</sup>基于主叶脉积分的方法,结合均匀 B 样条技术,实现了水稻叶片的弯曲效果.

收稿日期:2023-06-19

基金项目:国家自然科学基金(61862032)和江西省教育厅科技计划课题(GJJ210432)资助项目.

通信作者:杨 乐(1979—),男,江西进贤人,副教授,主要从事农业信息技术、深度学习等应用研究. E-mail:jxnzhyangle@163.com

Zhang Yonghui 等<sup>[9]</sup>将定量建模技术、空间几何技术与非均匀有理 B 样条(NURBS)方法结合,进一步构建了水稻叶片的 3 维几何模型. 郑晨曦等<sup>[10-11]</sup>提出基于 3 维数字化的小麦植株表型参数提取方法,实现了小麦形态结构及植株的可视化仿真,但有赖于仪器设备,数据精确度获取成本较高;与此同时,针对要在保证精度的条件下提高效率,他们开发了一种从骨架到网格模型的 3D 小麦建模方法,实现了小麦叶片从单一到整体及小麦植株的建模,进一步完善了小麦器官几何形态建模和 3 维可视化的研究. 李书钦等<sup>[12-13]</sup>基于田间实测数据和 NURBS 曲面建模技术,构造小麦叶片主脉控制点算法,在理想状态下加入叶片卷曲和扭曲特性,实现了小麦叶片的 3 维重建,但基于人工测量数据的控制点仍难以还原叶片在 3 维空间中的真实形态. 肖伯祥等<sup>[14]</sup>通过运动学分析的玉米叶片物理建模与参数确定方法,实现基于生物物理属性特征的玉米叶片高精度、高真实感动态建模与仿真,但当外界环境因素影响较大时,这种方法的有效性会降低. 裴文彤等<sup>[15]</sup>结合 B 样条曲线与分形 LS 文法,重建大豆叶片的 2 维几何模型,较好地保持了叶片的轮廓,叶片的模拟效果良好. 谢秋菊等<sup>[16]</sup>基于 3 次参数样条曲线和拉普拉斯变换将已建立的 2 维大豆叶片模型重构为 3 维模型,并提出叶片形变建模方法,得到了更具有真实感的大豆叶片模型;为静态作物叶片 3 维可视化建模提供了实践参考价值.

以上关于在农林作物叶片 3 维重建领域中的研究主要应用于水稻、小麦、玉米等农林作物,鲜有针对马铃薯叶片的研究. 然而,具有“地下苹果”之称的马铃薯,是许多地区的主要粮食作物之一,在农林作物中有着不可或缺的地位<sup>[17]</sup>. 因此,构建马铃薯叶片形态结构的 3 维模型在解决如何更加准确、全面地分析马铃薯动态生长发育规律的研究上具有重要意义. 为此,本文以东农“303”号马铃薯为研究对象,在自然生长条件下采集田间马铃薯叶片的测量数据及图像数据,提取叶片形态特征参数,通过标记与特征设定将形态数据转换为 NURBS 曲面

的控制点数据,结合插值 NURBS 曲面的 3 维可视化建模技术,重建马铃薯叶片表面网格模型,最终构建的马铃薯叶片模型的形态结构具有较高的精度和较强的真实感.

## 1 数据采集与方法

### 1.1 叶片图像数据采集

实验对象为江西农业大学试验田内播种的马铃薯叶片,种植品种为东农“303”号马铃薯. 通常马铃薯的叶形生长周期可分为上升期、稳定期、衰落期,实验选取在自然生长环境下发育正常、长势良好、无病虫害的稳定期叶片,利用智能手机进行拍摄,相机传感器为 SONY IMX707,分辨率为 5 000 万像素,镜头距叶片 10~15 cm 的位置垂直拍摄,图 1 为拍摄的叶片实验样本.



图 1 马铃薯叶片实验样本

### 1.2 叶片表型特征数据采集

马铃薯叶片通常为奇数不相等的羽状复叶,小叶大小相间,长 10~20 cm;叶柄长约 2.5~5.0 cm;小叶,6~8 对,卵形至长圆形,最大者长可达 6.0 cm,宽达 3.2 cm,最小者长宽均不及 1.0 cm,先端尖,基部稍不相等,全缘,两面均被白色疏柔毛,侧脉每边 6~7 条,先端略弯,小叶柄长约 1~8 mm<sup>[18]</sup>. 图 2 为对马铃薯叶片样本进行预处理. 预处理主要包括:1)利用游标卡尺对实验样本进行测量,获取实测数据;2)运用 *k*-Means 聚类算法<sup>[19]</sup>获取叶片的叶轮廓,通过计算得到叶片的叶面积、最大长度、最大宽度等数据;3)结合目前最新的 Segment Anything 图像处理技术<sup>[20]</sup>从图像中分割出马铃薯叶



(a) 图像分割(叶正面)

(b) 标记正面数据点

(c) 图像分割(叶背面)

(d) 标记背面数据点

图 2 马铃薯叶片分割及标点

片;4)通过画图程序人工标记马铃薯叶片数据点的 2 维坐标,然后根据实际叶片测量的形态特征参数,适当地对数据点的  $z$  坐标进行赋值,得到马铃薯叶片的 3 维坐标。

### 1.3 NURBS 曲面

非均匀有理 B 样条 (NURBS) 是基于有理贝塞尔曲线的非有理 B 样条的推广,有理贝塞尔曲线是贝塞尔曲线的推广<sup>[21]</sup>。在计算机辅助设计 (CAD) 系统中,NURBS 方法在几何建模中被公认为行业的标准,可以精确地表示曲线和曲面,并且可以通过调整控制点和权重来灵活地改变曲线和曲面的形状,具有较高的几何灵活性和计算效率<sup>[22]</sup>。NURBS 曲面等同于在  $u$  方向和  $v$  方向上由多条 NURBS 曲线多次构建而成且由  $(m+1)(n+1)$  个控制点构成的控制网格<sup>[23]</sup>。因而,可以准确地构建马铃薯叶片的几何形态曲面模型。

一张  $u$  方向为  $p$  次、 $v$  方向为  $q$  次的  $pq$  次 NURBS 曲面<sup>[24]</sup>表示如下:

$$Q(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} k_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} \quad (1)$$

由式(1)可知,构建 NURBS 曲面,需确定的数据有:NURBS 曲面基函数  $N_{i,p}(u)$  和  $N_{j,q}(v)$  在  $u$  向和  $v$  向的节点矢量  $\mathbf{U}=(u_0, u_1, \dots, u_{m+p+1})$  和  $\mathbf{V}=(v_0, v_1, \dots, v_{n+q+1})$ ;NURBS 曲面的控制点  $k_{i,j} (i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n)$ ,以构成  $(m+1)$  行  $(n+1)$  列的拓扑矩形阵列控制点网格;控制点所对应的权重因子  $w_{i,j}$ 。

因此,将马铃薯叶片数据点与 NURBS 曲面的控制点和权值建立联系,作为 NURBS 曲面的初始数据点。构建 NURBS 曲面,使用插值 NURBS 曲面拟合算法对原始数据点进行处理,反算 NURBS 曲面控制点,通过调整控制点和权值,插值重新构建 NURBS 曲面。本研究在 Windows 10 操作系统下以 PyCharm Community Edition 2023 作为开发工具,基于 Python 编程语言,并结合面向对象的 NURBS 评估库来重构马铃薯叶片的插值 NURBS 曲面模型。

## 2 插值 NURBS 曲面重构模型

NURBS 曲面在应用上常用形式包括:1)已知控制点坐标,通过点的坐标来定义 NURBS 曲面,如控制点形式、参数形式、三角剖分形式等;2)已知

NURBS 曲面的参数空间范围,给定部分数据点计算曲面控制点,如插值 NURBS 曲面拟合<sup>[25]</sup>。前者被称为正算问题,后者被称为反算问题。本文在构建马铃薯叶片曲面模型过程中利用图像处理方法提取叶片的数据点,根据数据点来求解叶片的控制点,再由控制点构建曲面模型。在马铃薯叶片 3 维可视化曲面模型构建过程中反算问题步骤有:1)给定数据点,确定节点参数范围,计算节点矢量;2)通过节点矢量,计算 NURBS 曲面基函数,反算控制点。

### 2.1 计算节点矢量

标记  $(m+1)(n+1)$  个数据点  $\{Q_{i,j}\} (i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n)$ 。重构  $pq$  次的插值 NURBS 曲面,可表示为

$$Q_{i,j} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_i) N_{j,q}(\bar{v}_j) k_{i,j} = S(\bar{u}_i, \bar{v}_j), \quad (2)$$

其中通过给定数据点计算  $(\bar{u}_i, \bar{v}_j)$ ,从而确定  $u$  方向和  $v$  方向的节点矢量  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  的合理取值。本文选用累积弦长参数化法,以  $u$  方向为例, $v$  方向同理可得。给出累积弦长参数化法公式,计算节点参数  $\bar{u}_0, \bar{u}_1, \dots, \bar{u}_m$  的方法如下所示:

$$d = \sum_{i=1}^m |Q_{i,j} - Q_{i-1,j}|, \quad \begin{cases} \bar{u}_i = 0, & i=1, \\ \bar{u}_i = 1, & i=m, \\ \bar{u}_i = \bar{u}_{i-1} + |Q_{i,j} - Q_{i-1,j}|/d, & 1 < i < m, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $d$  为  $u$  方向每一条 NURBS 曲线的总弦长,取所有  $\bar{u}_i (j=0, 1, \dots, n)$  的平均值得到每个节点  $\bar{u}_i$ ,计算方法为

$$\bar{u}_i = \sum_{j=0}^n \bar{u}_i^j / (n+1), i=0, 1, \dots, m. \quad (4)$$

接着采用

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = \dots = u_r = 0, \\ u_{m-r} = u_{m-r+1} = \dots = u_m = 1, \\ u_{i+r} = \sum_{i=1}^{i+r-1} \bar{u}_i / r, i=1, 2, \dots, m-r \end{cases}$$

平均法确定节点矢量  $\mathbf{U}$  的合理取值。

### 2.2 控制点反算

针对待求的控制点  $k_{i,j}$ ,可将式(2)改写为

$$Q_{i,j} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_i) N_{j,q}(\bar{v}_j) k_{i,j} = \sum_{i=0}^m N_{i,p}(\bar{u}_i) R_i(v_j),$$

其中  $u$  方向的控制点被  $v$  方向的等参数曲线控制点  $R_i(v_j)$  所替代,即



$$R_i(v_j) = \sum_{j=0}^n N_{j,q}(\bar{v}_j) k_{i,j}, i=0,1,\dots,m, \quad (5)$$

$$\begin{cases} N_{i,0}(\bar{u}_i) = \begin{cases} 1, u_i \leq \bar{u}_i \leq u_{i+1}, \\ 0, \text{其他}, \end{cases} \\ N_{i,p}(\bar{u}_i) = \frac{\bar{u}_i - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(\bar{u}_i) + \frac{u_{i+p+1} - \bar{u}_i}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(\bar{u}_i). \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)和式(4)得到的节点参数  $\bar{u}_i$  和节点  $\bar{u}_i$  代入式(6)中,并规定  $0/0=0$ ,得到节点矢量  $U$  的非均匀有理  $B$  样条基函数,结合给定数据点  $\{Q_{ij}\}$ ,代

入式(6)中做  $n+1$  次曲线插值,可得到  $v$  方向的等参数曲线控制点  $R_i(v_j)$ . 同理,运用得到的节点参数  $\bar{v}_j$  和节点  $\bar{v}_j$  计算出节点矢量  $V$  的非均匀有理  $B$  样条基函数,通过  $v$  方向的等参数曲线控制点  $R_i(v_j)$ ,代入式(5)中做  $m+1$  次曲线插值,得到控制点  $k_{i,j}$ ,这样就反算出了插值 NURBS 曲面所对应的控制点.

综上所述,可通过已知标记的数据点分别反算出叶正面、叶背面和叶柄的控制点,将标记的数据点和反求的控制点一起可视化,结果如图3所示.

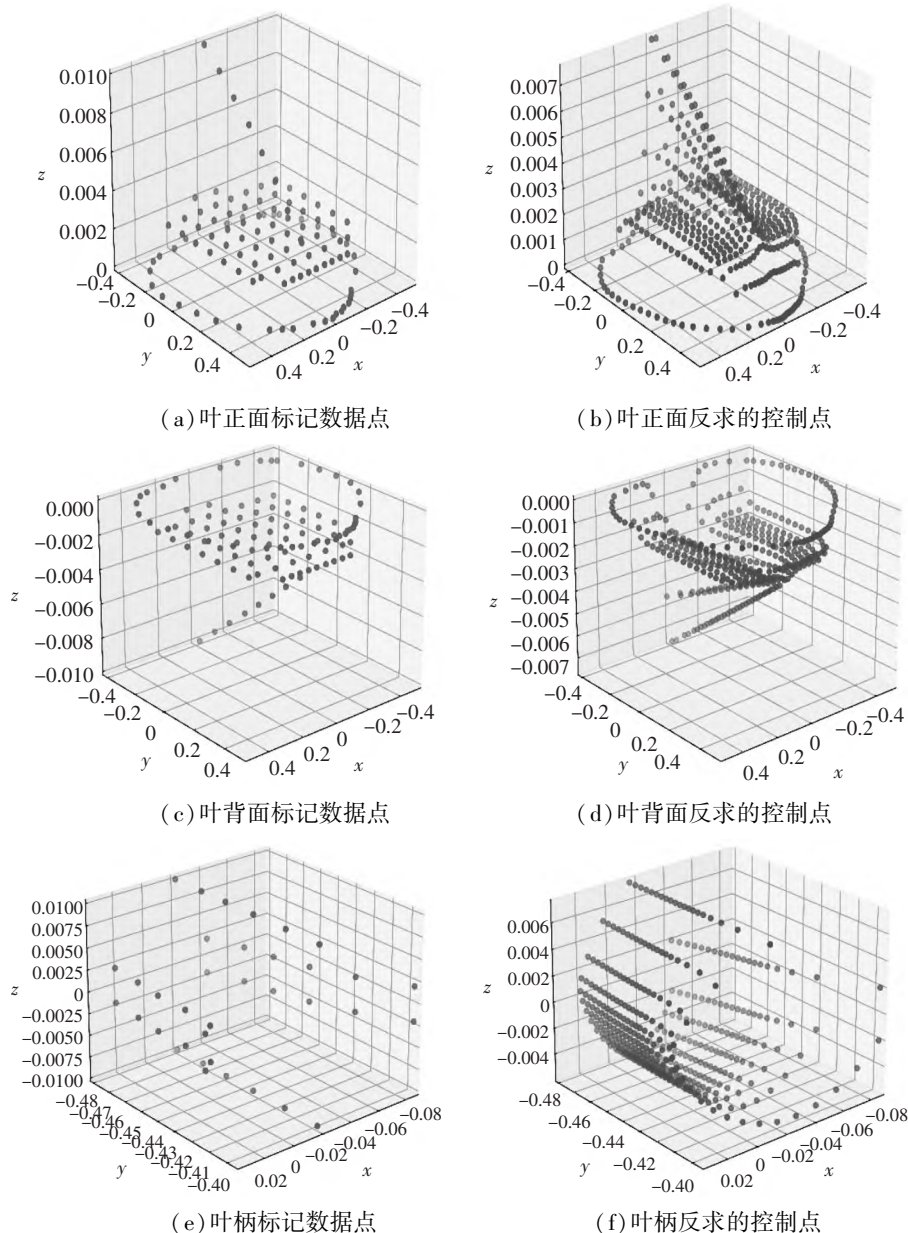


图3 插值 NURBS 曲面的数据点和控制点

### 2.3 权重因子的确定

在反求到插值 NURBS 曲面的控制点后,通过插值 NURBS 曲面所需要满足的特定条件或目标,从而确定其权重因子.通常,权重因子可以用来调

整曲面的形状,使其满足特定的设计要求.确定权重因子的常用方法有:

1) 均匀权重.若没有特定的设计要求,则可以为所有控制点分配相同的权重因子(如权重为1).

这将使得曲面在控制点之间平滑地插值。

2) 基于距离调整权重. 若要求曲面更紧密地贴合某些控制点, 则可以根据控制点之间的距离分配权重. 距离较大的控制点可以分配较大的权重, 使曲面在这些点附近更紧密地贴合。

3) 基于特定条件优化权重. 对于有特定的设计目标(如最小化曲面的曲率或使曲面与某些约束边界对齐), 常需要采用优化算法(如梯度下降或遗传算法)来确定权重因子. 通过定义一个目标函数来描述曲面与设计目标之间的差异, 并使用优化算法将差异最小化。

4) 针对一组离散数据点, 可以使用曲面拟合算法(如最小二乘法)来确定权重因子. 这种方法通常需要解决一个线性或非线性最小二乘问题, 以找到最佳的权重因子, 使曲面尽可能地接近给定的数据点。

值得考虑的是, 确定权重因子的方法取决于实验的具体需求和设计目标. 在实际应用中, 需要尝试不同的方法, 以找到最适合问题的解决方案. 针对权重因子如何确定的问题, 本文根据马铃薯叶片的 3 维重建要求, 对比 2 种方法的效果, 对于叶面部分采用均匀权重确定插值 NURBS 曲面的权重因子, 对于叶柄部分采用曲面拟合算法确定插值 NURBS 曲面的最优权重因子。

### 3 结果与分析

本文提出的重建方法选择叶形生长期处于稳定期的马铃薯叶片, 假定叶片处在无弯曲、扭曲等形变及无病害的理想状态下, 构造马铃薯叶片的插值 NURBS 曲面 3 维模型。

#### 3.1 叶脉的 3 维重建

由于本文关注的是马铃薯叶片的形似, 其叶脉等细节对马铃薯叶片外形或光照等并无影响, 所以未对叶脉重构进行深入研究. 因此, 本文直接以直线代替叶脉, 以顶部点与底部点的直线为主叶脉, 然后通过控制点绘制 2 级叶脉的线框图, 图 4 为叶脉重建效果图。

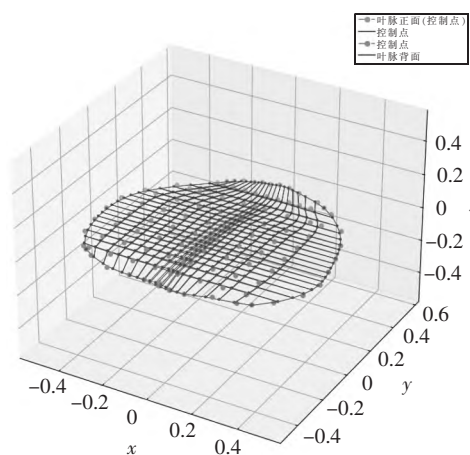


图 4 叶脉重建模型

#### 3.2 叶面的 3 维重建

标记马铃薯叶片叶面数据点的 2 维坐标, 通过叶面的实测数据, 设定叶面数据点的 3 维坐标, 共有 10 行数据点, 每行有 11 个数据点, 在理想状态下构造  $10 \times 11$  控制点数组, 确定  $u$  方向的节点矢量为  $(0, 0, 0, 0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.9, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$ ,  $v$  方向的节点矢量为  $(0, 0, 0, 0, 0.125, 0.250, 0.375, 0.500, 0.625, 0.750, 0.875, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000)$ , 反算得到新的控制点, 通过均匀权重的方法设定叶面的权重因子均为 1, 重建马铃薯叶片叶面的曲面模型, 重建的效果如图 5 所示。

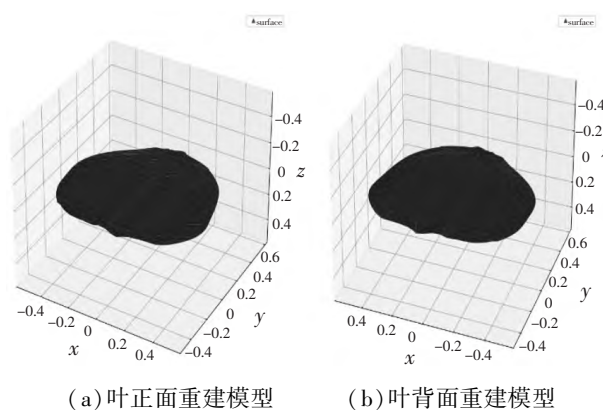


图 5 叶面重建模型

#### 3.3 叶柄的 3 维重建

通过标记数据点和实测数据, 设定马铃薯叶片叶柄的 3 维坐标, 在理想状态下构造  $6 \times 6$  的控制点数组, 确定  $u$  方向的节点矢量为  $(0, 0, 0, 0, 0.3, 0.7, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$ ,  $v$  方向的节点矢量为  $(0, 0, 0, 0, 0.3, 0.7, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$ , 结合控制点反算方法求得新的控制点, 通过拟合曲面插值算

法得到最优权重因子,重建插值 NURBS 曲面的马铃薯叶柄曲面模型,结果如图 6 所示.

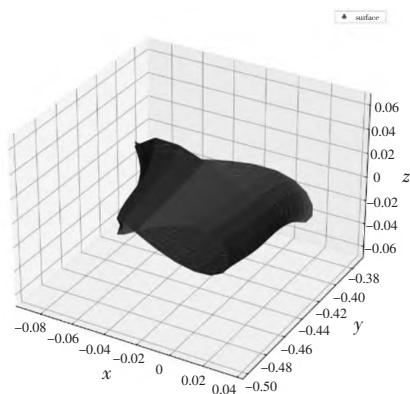


图 6 叶柄重建模型

3.4 曲面容器合成叶片

在分别重建叶面和叶柄的曲面模型后,将 3 个部分的曲面模型加入曲面容器中,借助 VisVTK V 渲染曲面,合成效果如图 7 所示.

由图 7 可以看出:东农“303”号马铃薯叶片的模拟模型与实际样本叶片测量的形态数据基本一致,吻合度较高.

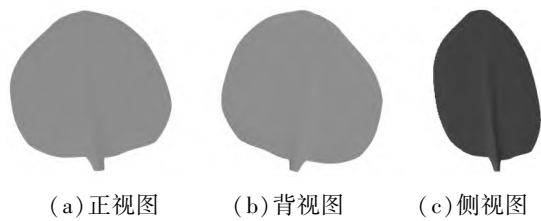


图 7 马铃薯叶片曲面模型的三视图

3.5 叶片重建模型数据与实际数据对比

为验证重建的马铃薯叶片插值 NURBS 曲面模型和实际样本的吻合程度,采取的实验步骤如下:首先,选取来自公共数据集 Mendeley Data<sup>[26]</sup>的健康马铃薯叶片,结合 OpenCV 技术对 1 000 幅大小为 256×256 的马铃薯叶片图像进行阈值化及分割处理,得到马铃薯叶片的轮廓,计算马铃薯叶片的最大长度和最大宽度,取平均值;然后,由于从图像中直接获取的数据为像素数据,所以需针对获取的像素数据进行转换;最后,基于重建模型的测量数据、数据集的平均数据和实验样本的平均实测数据,对马铃薯叶片的长度和宽度进行对比,得到的对比结果如表 1 和表 2 所示.

表 1 马铃薯叶片重构模型与数据集样本对比

形态数据	重构模型/cm	数据集样本/cm	绝对误差/cm	吻合度/%
平均长度	5.503	5.206	0.303	99.697
平均宽度	5.530	5.256	0.314	99.686

表 2 马铃薯叶片重构模型与实验样本对比

形态数据	重构模型/cm	实验样本/cm	绝对误差/cm	吻合度/%
平均长度	5.503	5.360	0.143	99.857
平均宽度	5.530	5.329	0.201	99.799

由表 1 和表 2 可看出:3 维重建模型与数据集样本、实际样本的形态数据大致相同,吻合度较高.这表明本文基于插值 NURBS 曲面重构的马铃薯叶片模型较为真实地反映了马铃薯叶片的形态特征,可结合性与可扩展性较高.

4 讨论与结语

- 1)借助 Segment Anything 图像分割技术处理采集到的马铃薯叶片图像,可以准确、快速地获取叶片信息,同时保证叶片数据的真实有效.
- 2)插值 NURBS 曲面的马铃薯叶片 3 维重建,

通过画图程序标记叶片基本结构(叶脉、叶面、叶柄)数据点的 2 维坐标,根据实测数据设定叶片的 3 维坐标,构建控制点反算的算法得到新的控制点,计算节点矢量,利用均匀权重和拟合插值曲面算法确定权重因子,通过 VisMPL 重建叶脉、叶面、叶柄的 3 维曲面模型,引入曲面容器,利用 VisVTK 重建马铃薯叶片的 3 维曲面模型.该方法有效实现了马铃薯叶片的 3 维重建,曲面模型吻合马铃薯叶片的形态特征.

3)基于表型基本结构数据和插值 NURBS 曲面重构马铃薯叶片的 3 维模型,通过关注叶片背面的构造,为马铃薯叶片的 3 维可视化建模提供了参考.



但本研究仍存在一些不足:本文选取的马铃薯叶片处于在自然环境生长下的理想状态,针对马铃薯叶片的形态特征进行 3 维重建,对于叶片纹理及弯曲卷曲等自然因素并未深入研究.在以后的工作中,需进一步提升马铃薯叶片 3 维重建的真实感,并基于实测数据达到对马铃薯叶片生长动态模拟的目的,使研究更具有参考意义.此外,本文运用计算机技术实现了马铃薯叶片表面的 3 维重建,虽然有效重建了叶正面、叶背面和叶柄的曲面模型,但是仍仅局限于表面结构,因此,若结合 NURBS 曲面深入研究叶片内部结构的 3 维重建,则将加深对马铃薯叶片等作物叶片的理解,实现更具有研究价值的 3 维重建,这也将是今后研究的重要内容.

## 5 参考文献

- [1] 崔宁波. 智慧农业赋能乡村振兴的意义、挑战与实现路径[J]. 人民论坛, 2022(5): 26-28.
- [2] 姚娟, 刘铁梅. 基于作物模型的计算机模拟软件研究[J]. 现代农业科技, 2010(20): 31-33, 36.
- [3] 吴峰峰, 朱波, 周恺, 等. 虚拟作物模型的研究现状及展望[J]. 北方园艺, 2020(1): 162-169.
- [4] MARSHALL-COLON A, LONG S P, ALLEN D K, et al. Crops in silico: generating virtual crops using an integrative and multi-scale modeling platform[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 786.
- [5] INVERNIZZI M, PALEARI L, YANG Yubin, et al. Genotype-specific models for leaf architecture as affected by leaf position and age. Model development and parameterization using smartphone-based 3D plant scans[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 249-261.
- [6] ALARCON V J, SASSENATH G F. Modeling cotton (*Gossypium* spp.) leaves and canopy using computer aided geometric design (CAGD)[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(12): 1951-1963.
- [7] MIAO Teng, GUO Xinyu, XIAO Boxiang, et al. A real-time 3D visualization approach for the appearance of crop leaves[J]. Bangladesh Journal of Botany, 2016, 45(S4): 895-904.
- [8] 唐子宗, 吴盼盼, 杨乐, 等. 基于 B 样条曲线的水稻叶片可视化建模[J]. 中国稻米, 2022, 28(2): 77-81.
- [9] ZHANG Yonghui, TANG Liang, LIU Xiaojun, et al. Modeling curve dynamics and spatial geometry characteristics of rice leaves[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(10): 2177-2190.
- [10] 郑晨曦, 温维亮, 卢宪菊, 等. 基于 3 维数字化的小麦植株表型参数提取方法[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(2): 150-162.
- [11] ZHENG Chenxi, WEN Weiliang, LU Xianju, et al. Three-dimensional wheat modelling based on leaf morphological features and mesh deformation[J]. Agronomy, 2022, 12(2): 414.
- [12] 李书钦, 刘海龙, 诸叶平, 等. 基于实测数据和 NURBS 曲面的小麦叶片 3 维可视化[J]. 福建农业学报, 2016, 31(7): 777-782.
- [13] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于 NURBS 曲面的小麦叶片 3 维可视化研究与实现[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 89-95.
- [14] 肖伯祥, 秦洪. 玉米叶片物理建模与参数确定的运动学分析方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(5): 718-725.
- [15] 裴文彤, 朱景福. 结合 B 样条曲线与 LS 文法的大豆叶片 2 维几何建模[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 411-414.
- [16] 谢秋菊, 苏中滨, 孙红敏. 大豆叶片 3 维重建及形变技术研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 220-223.
- [17] 谢从华. 马铃薯产业的现状与发展[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2012(1): 1-4.
- [18] 王田利, 谢小强. 现代马铃薯高效生产实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 17-20.
- [19] JAIN A K. Data clustering: 50 years beyond K-means[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(8): 651-666.
- [20] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything[EB/OL]. [2023-02-19]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/619962145>.
- [21] PIEGL L. On NURBS: a survey[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1991, 11(1): 55-71.
- [22] BINGOL O R, KRISHNAMURTHY A. NURBS-Python: an open-source object-oriented NURBS modeling framework in Python[J]. SoftwareX, 2019, 9: 85-94.
- [23] 赵作智. 基于非均匀有理 B 样条(NURBS)的曲面反求的研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [24] 黄紫双. 基于 NURBS 的曲面拟合和优化方法研究

- [D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.
- [25] SOLIMAN E, ALZAHRANI B. Quality assessment of 3D printed products [EB/OL]. [2023-06-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9522553>.
- [26] GEETHARAMANI G, PANDIAN J A. Identification of plant leaf diseases using a nine-layer deep convolutional neural network [J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 76:323-338.

## The 3D Reconstruction of Potato Leaves Based on Interpolated NURBS Surfaces

WANG Longfei, PENG Jun, YANG Le\*, LI Ziyi, LIU Xinyu

(School of Computer and Information Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China)

**Abstract:** With the rapid development of computer virtual technology, virtual crop technology has become an important tool for the study of the growth and development status of rice, wheat, corn and other crops. The existing research on iterative reconstruction of crop leaves mainly focuses on the front surface of the leaves, while ignoring the back structure. In this study, potato leaves are selected as the object of study for the problem of crop leaf 3D reconstruction. Firstly, using the measured data and marked data of potato leaves, combined with the non-uniform rational B spline (NURBS) surface reconstruction technique, the node vector, control points, weight factors and other relevant parameters of the interpolated NURBS surface are determined by the control point back calculation method and the weight factor fitting interpolated surface algorithm. Secondly the iterative reconstruction of leaf veins is performed by the interpolation NURBS curve method. Finally the color rendering and drawing of the surfaces are made using VisMPL and VisVTK, and surface containers are introduced to fuse the interpolated NURBS surfaces of the front, back, and petiole of the leaves. The results show that the method in this paper is based on the traditional method with the addition of the abaxial surface structure of the leaf, and performs well in reconstructing the 3D surface model of the potato leaf, the three-dimensional reconstruction of potato leaf morphological features is effectively achieved, which provides technical support for potato leaf research.

**Key words:** virtual crop technology; potato leaves; NURBS; morphological features; three-dimensional reconstruction

(责任编辑:冉小晓)