

基于改进 Harris 角点检测的虚拟樱桃叶片重建方法

杨立伟¹ 赖文聪¹ 刘刚¹ 刘鑫来¹ 张俊宁² 吕树盛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. 北京信息科技大学机电工程学院, 北京 100192;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 为了分析樱桃树叶片的形态结构,为樱桃树冠层光照分布及樱桃果树整形修剪提供理论基础,提出了一种基于改进 Harris 角点检测及 NURBS 曲线的樱桃树叶片重建方法。利用中值滤波法及经典边缘检测算法对获得的原始樱桃树叶片图像进行预处理,得到树叶轮廓。针对传统 NUBRS 曲线原理重构轮廓时无法构成闭合曲面,特征点之间相互干扰等问题,提出了一种新的算法来重构轮廓。该算法首先将特征点分为左右两部分,分别重建左右两侧轮廓,再将两者连接得到完整的轮廓;其次运用改进的 Harris 角点检测法提取角点来作为特征点;再次,通过检测窗口中心点灰度与其周围 n 邻域内其他像素点灰度的相似程度,计算灰度之差来设定一个阈值,并根据该阈值范围提取角点;最后,根据虚拟轮廓构建虚拟叶片。实验结果表明,改进后的算法大大减少了计算量,平均消耗时间由 4.61 s 减少到 2.30 s。本文方法较真实地重构了樱桃树叶片边缘形状,为樱桃树冠层光照分布计算提供了技术支持。

关键词: 樱桃叶片; 角点检测; 轮廓重建

中图分类号: S661.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S1-0213-05

Virtual Leaf Reconstruction Method Based on Improved Harris Corner Detection

YANG Liwei¹ LAI Wencong¹ LIU Gang¹ LIU Xinlai¹ ZHANG Junning² LÜ Shusheng³

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Mechanical Electrical Engineering School, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to analyze the morphological structure of cherry tree leaves and provide a theoretical basis for the light distribution of cherry tree canopy and the shaping and pruning of cherry fruit trees, a method for reconstructing cherry tree leaves was proposed based on improved Harris corner detection and Nurbs curve. The obtained original cherry tree leaf images were preprocessed by median filtering method and classical edge detection algorithm to obtain leaf contours. An algorithm was proposed to reconstruct the contour, aiming at the problems that a closed surface cannot be formed when the contour was reconstructed by the traditional NUBRS curve principle, and the feature points interfere with each other. The algorithm first divided the feature points into left and right parts, the contours of the left and right sides were reconstructed respectively, and then the two were connected to obtain a complete contour. Secondly, the improved Harris corner detection method was used to extract corner points as feature points. Thirdly, by detecting the degree of similarity between the gray value of the center point of the window and the gray values of other pixels in the surrounding n neighborhood, the difference between the gray values was calculated to set a threshold, and the corner points were extracted according to the threshold range. Finally, a virtual leaf was constructed according to the virtual contour. Experimental analysis showed that the improved algorithm greatly reduced the amount of useless computation, and the average consumption time was reduced from 4.61 s to 2.30 s. Based on the improved algorithm, the edge shape of cherry tree leaves can be perfectly maintained, which provided technical support for the calculation of light distribution in the cherry tree canopy.

Key words: cherry leaves; corner detection; contour reconstruction

0 引言

随着计算机科学技术的快速发展,将计算机知识与植物学知识有机结合,使得对农林作物形态结构及其功能的可视化研究成为可能^[1-2]。重建樱桃叶片是温室樱桃树动态模拟生长的重要组成部分,叶片作为植物的重要组成部分,是制造有机养料的重要器官,与樱桃树生长发育以及果实成长密切相关。因此,对樱桃叶片进行重建具有重要意义。

国内外学者针对植物叶片的重建开展了大量的研究工作^[3-5]。主流的植物叶片重建方法有基于点云的三维重建^[6-9]以及基于图像处理的植物叶片重建^[10-11]。然而,由于三维激光扫描设备价格昂贵,体积较大,不易携带,使用也多有限制,而基于图像处理的方法只需一部手机或照相机就可以获取原始的叶片图像,信息获取成本减少。

SUN 等^[12]提出了一种从点云数据中提取叶片轮廓的方法,但此方法使用激光扫描获取点云,成本高昂,操作复杂;HASSAN 等^[13]提出了一种基于计算机视觉的叶片轮廓提取方法,用于识别各种植物;谢秋菊等^[14]通过边缘检测技术得到大豆叶片轮廓像素点,再通过三次参数样条曲线结合叶片形态特征点得到叶片轮廓曲线,最后通过二维大豆叶片重构其三维模型。现今大多数研究都是面向大田种植作物,而针对樱桃叶片的重建研究较少,且目前重构樱桃树叶片轮廓方面存在精度不高,无法构成闭合曲面,成本高,实际操作复杂等问题。本文提出一种基于改进 Harris 角点检测及 NURBS 曲线的樱桃树叶片重建方法。

1 数据采集及预处理

1.1 图像采集

实验对象为山东省烟台市农业科学研究院温室大棚内的樱桃树叶片,品种为“齐早”、“早早阳”、“鲁东三号”。拍摄设备为智能手机,手机拍照的传感器是 IMX689,分辨率为 4 800 万像素,拍摄时镜头垂直于背景板,镜头距离叶片 10 cm,图 1 为被测叶片样本。

1.2 图像预处理

1.2.1 去噪及分割

由于采集原始图像时受到人为因素或是外界各种干扰,且彩色图像蕴含信息较大,不利于信息的有效提取,所以需对原始图像进行灰度处理。处理后的图像如图 2a 所示,噪声干扰极大降低,数据得以精简,为后续图像处理减少了计算量,同时还最大化地保留了有用的原始数据。



图 1 叶片样本
Fig. 1 Leaf sample map

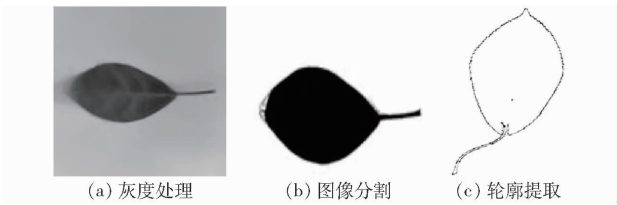


图 2 图像预处理
Fig. 2 Image preprocessing

得到灰度图像后,需对其进行滤波^[15]处理,一般滤波可分为空间域滤波和变换域滤波。空间域滤波中,平滑滤波器算法简单,速度快,但精度不高。而中值滤波器对椒盐噪声的抑制比较好,但只适用于数据量少的图像。空间域低通滤波对椒盐噪声过滤效果较差,图像较为模糊。而频域滤波在去噪时不仅计算量大,而且会因图像边缘信息损失而使图像边缘模糊。本文仅需提取叶片边缘曲线,线条较少,故采取空域滤波中的中值滤波算法来对灰度图进行滤波处理。

滤波后,需将叶片图像与背景板分离以获取完整的图像边缘。图像分割方法一般分为阈值法、边缘法、区域法、聚类分析法及小波变换法等。由于阈值分割法可以直接利用图像的灰度特性,计算简单高效,适用于相差较大的不同目标与背景的有效分割,所以本文采用阈值分割法进行图像分割,结果如图 2b 所示。

1.2.2 轮廓提取

为了重构虚拟叶片轮廓,需要得到准确的叶片轮廓特征,因此需要利用分割后的图像提取出树叶轮廓。

图像边缘检测算法大体上分为两大类:经典边缘检测方法和利用信号处理技术进行检测的方法^[16]。由于经典边缘检测方法在计算机图像处理上最为常用,因此本文主要采用经典边缘检测算法提取树叶轮廓。

经典边缘检测方法又分为 Sobel 算子、Prewitt 算子、Robert 算子、Canny 算子等^[17]。与前 3 种算法

相比, Canny 算子具有定位良好、检验性准确、响应次数少等优势, 但其弊端在于 Canny 算法中非极大值抑制只在 4 个方向进行, 而自然图像中的边缘梯度方向不一定沿着这 4 个方向, 因此, 为了得到更准确的边缘轮廓, 首先找出在一个像素点上最能吻合其所在梯度方向的两侧的像素值, 其次因为图像中的像素点是二维矩阵, 所以对于某一像素梯度方向上两侧点不存在的问题通过两侧插值进行解决。最后利用双阈值检测设置上下限阈值的方法将边缘进行连接, 可以得到更好的边缘轮廓。改进后的 Canny 算子提取樱桃树叶片轮廓效果如图 2c 所示。

2 轮廓构建

轮廓构建有以下两种常用方法: ①根据 Canny 算子得到的边缘曲线选取特征点, 利用特征点进行三角网格化构建叶片外轮廓。②利用 NURBS 曲线原理根据方法①中的关键点提取曲线控制点, 得到控制点后结合关键点重构轮廓。这两种方法实践结果如图 3 所示。

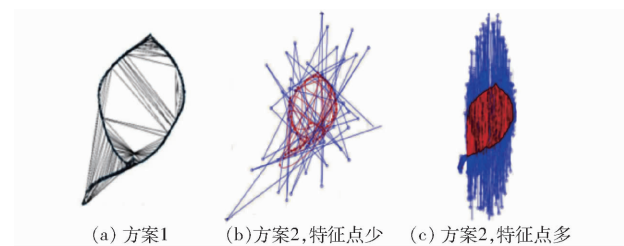


图 3 传统方案轮廓重构图

Fig. 3 Traditional scheme outline reconstruction diagrams

其中图 3a 为第 1 种方案, 从图中可以发现重构边缘不够平滑, 且三角化后的三角平面较大, 无法为后期显示叶脉等细节信息做铺垫, 且叶茎与叶面上的点冲突构成了新的面, 影响后续叶面细节; 而图 3b、3c 为第 2 种方案, 图 3b 为选取少量特征点展示, 发现无法构成闭合曲面, 图 3c 为选取大量特征点进行 NUBRS 曲线重构, 可以发现特征点间相互干扰且重构效果不理想。

针对上述问题, 本文提出基于改进 Harris 角点检测算法来重构叶片轮廓, 步骤如下:

(1) 利用 Canny 算子得到的边缘曲线提取角点, 将角点作为特征点^[18]。

(2) 由于叶茎特征点影响叶边缘, 因此将叶茎特征点去除, 避免干扰。

(3) 通过遍历查找, 找出叶底部坐标与顶部坐标, 根据顶部以及底部坐标划分出左边缘特征点以及右边缘特征点, 利用这些特征点分别重建左右边缘轮廓, 最后再连接左右边缘轮廓得到完整的叶片轮廓。

2.1 特征点选取

本文利用角点作为轮廓特征点, 常用的角点提取方法为 Harris 角点检测法^[19]。传统的 Harris 角点检测法原理是在图像中利用一个滑动的窗口平移, 根据平移过程中窗口灰度变化提取出变化剧烈或明显的点, 此点通常情况下为角点, 窗口尺寸通常设置为 5×5 、 7×7 、 9×9 。窗口移动过程中通常出现 3 种现象: 平坦、边缘、角点。

传统的 Harris 方法有 3 点不足: ①不具有尺度不变性。②提取角点为像素级。③算法检测时间较长。本文仅针对第 3 点进行改进, 原算法检测基于图像像素灰度变化梯度, 灰度图像角点附近的像素灰度变化非常大, 其梯度也非常大。即在非角点位置邻域里, 各点的像素值变化不大, 甚至几乎相等, 其梯度相对也比较小。因此本文通过检测窗口中心点灰度与其周围 n 邻域内其他像素点灰度值的相似程度计算灰度之差来设定一个阈值, 根据阈值范围来提取角点, 减少无用计算量, 加快计算机计算速度。

设窗口平移量为 (u, v) , 则此窗口中的点产生的灰度变化为 $E(u, v)$, 即

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) (I(x+u, y+v) - I(x, y))^2 \quad (1)$$

$$\text{其中 } w(x, y) = e^{-(x^2+y^2)/\sigma^2} \quad (2)$$

式中 $I(x+u, y+v)$ ——平移后灰度

$I(x, y)$ ——平移前灰度

$w(x, y)$ ——窗口函数 σ ——标准差

将平移后灰度进行泰勒展开得

$$I(x+u, y+v) = I(x, y) + I_x u + I_y v + O(u^2, v^2) \quad (3)$$

式中 I_x, I_y ——窗口平移量在水平以及垂直方向的一阶导数

O ——泰勒展开式余项

将式(2)、(3)代入式(1)可得

$$E(u, v) \cong [u \ v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M} = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$$

在未加阈值情况下通过判断 $\mathbf{M}$ 特征值来选取角点。即设特征值为 $\lambda_1 < \lambda_2$ 或 $\lambda_1 > \lambda_2$ 时窗口在边缘上, λ_1, λ_2 都很小时窗口在平坦区域, $\lambda_1 \approx \lambda_2$ 且都很大时窗口在角点上。

设 n 邻域为 t , 即 $0 \leq |I(x+u, y+v)| \leq t$, 可得结论:

(1) 当前中心像素点的 t 邻域范围内都是与之

相似的像素点,所以该像素点邻域范围内的梯度不会很大,因此角点检测时,应该排除此类像素点,不将其作为角点的候选点。

(2)当前中心像素点的 t 邻域范围内没有与之相似的像素点,所以该像素点为孤立像素点或者是噪声点,因此角点检测时,也应该排除此类像素点。

(3)非上述两种情况时,通过式(4)进行计算。

表 1 为改进前后平均消耗时间对比。由表 1 可知,改进后提取时间明显缩短,改进前后对比角点提取效果见图 4,通过对比可知,图 4a 明显比图 4b 角点多,重构轮廓角点越多,则重构的效果越好,因此本文采用改进后算法进行角点提取。

表 1 改进前后平均消耗时间对比

Tab.1 Comparison of average consumption time before and after improvement s

算法	图 4a	图 4b
原算法	4.61	4.53
改进后算法	2.30	2.26

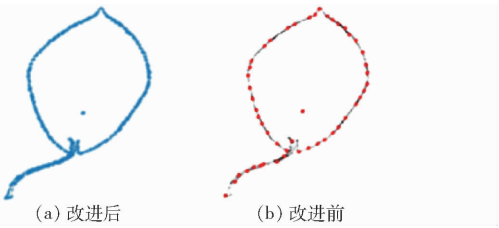


图 4 改进前后对比

Fig.4 Comparison before and after improvement

2.2 改进 NURBS 曲线法轮廓构建

NURBS 曲线在应用上有两种常用形式:已知控制点,求解曲线或曲面及其上面的点;已知曲线或曲面部分数据点求解曲线曲面控制点。

前者称为正算问题,后者称为反算问题。因本文在构建虚拟植物过程中利用计算机视觉方法提取植物轮廓及特征点,又根据特征点来求虚拟植物轮廓曲线控制点,根据控制点构建植物轮廓曲线,即本文中对 NURBS 曲线正反算问题都有应用。

虚拟植物轮廓构建过程中反算问题步骤为:①计算节点矢量。②计算边界条件。③反算控制点。

2.2.1 计算节点矢量

利用计算机视觉提取图像中的轮廓得到一组特征点 $P_i(i=0,1,\cdots,n)$,该组特征点首末端点既保证与构造曲线首末端点重合,又保证 P_i 依次与构造曲线定义域内节点 $u_{i+k}(i=0,1,\cdots,n)$ 依次对应。将特征点参数化来确定 P_i 的参数值 $u_{i+k}(i=0,1,\cdots,n)$ 。采用累积弦长参数法,表达式为

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = u_{n+6} = 1 \\ u_i = u_{i-1} + |P_i - P_{i-1}| / \sum_{i=1}^n |P_i - P_{i-1}| \\ (i = 1, 2, \cdots, n - 1) \end{cases} \tag{5}$$

2.2.2 边界条件

由于未知控制点数大于方程数,因此为了求解上述方程需增加两个边界条件,即切矢条件及自由端点条件。

切矢条件:当首末端的切线方向固定时,得

$$\begin{cases} D_1 - D_0 = \frac{D_3}{3}p'_0 \\ D_{n+2} - D_{n+1} = \frac{D_{n+2}}{3}p'_n \end{cases} \tag{6}$$

式中 p'_0, p'_n ——首末端点切矢

闭曲线条件:曲线首末端点重合且二阶连续时得

$$\begin{cases} D_0 = D_{n+1} \\ D_1 = D_{n+2} \end{cases} \tag{7}$$

2.2.3 反算控制点

对于连续 3 次 NURBS 闭合曲线,因为首末数据点相重, $n-1$ 个方程便可求出 $n+1$ 个控制点,所以 NURBS 三次闭曲线控制顶点反算矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & \cdots & a_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \\ & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & b_{n-3} & c_{n-3} \\ c_{n-2} & \cdots & a_{n-2} & b_{n-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_{n-3} \\ D_{n-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{n-3} \\ e_{n-2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 D_i ——控制点, $i=0,1,\cdots,n-2$

a_i, b_i, c_i ——系数

NURBS 三次曲线两端点重复度取 4,以切矢条件和闭合曲线条件为边界条件得

$$\begin{cases} a_i = \frac{D_{i+2}^2}{D_i + D_{i+1} + D_{i+2}} \\ b_i = \frac{D_{i+2}(D_i + D_{i+1})}{D_i + D_{i+1} + D_{i+2}} + \frac{D_{i+2}(D_{i+2} + D_{i+3})}{D_i + D_{i+1} + D_{i+2}} \\ c_i = \frac{D_{i+1}^2}{D_i + D_{i+1} + D_{i+2}} \\ e_1 = p_0 - \frac{D_3}{3}p'_n \\ e_n = p_n - \frac{D_{n+2}}{3}p'_n \\ e_i = (D_{i+1} + D_{i-2})p_{i-1} \end{cases} \tag{9}$$

求解式(8)、(9)求出控制点 D_i 。

NURBS 曲线正反问题求解结果如图 5 所示。

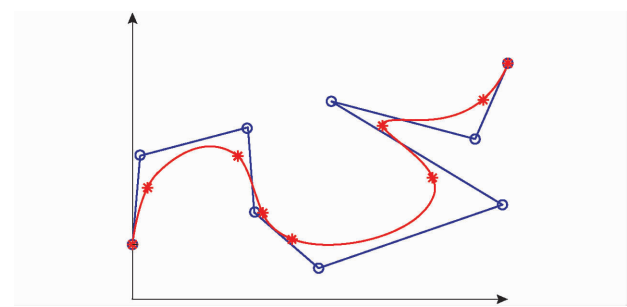


图 5 NURBS 曲线测试结果
Fig. 5 NURBS curve test result

实际叶片轮廓重构效果如图 6 所示。由图 6 可以发现,本文方法较真实地重建了樱桃树叶片边缘形状。

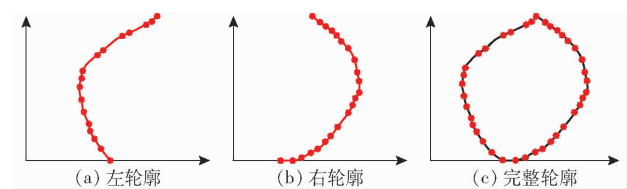


图 6 边缘重构效果
Fig. 6 Edge reconstruction renderings

3 叶面构建

3.1 叶脉重构

本文关注的是樱桃树叶片的形似,其叶脉等细节对樱桃树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。

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,然后二级叶脉利用 L 系统^[20]从主叶脉进行左右生长直至遇到叶片边缘停止,图 7 为二级叶脉重构效果图。

3.2 叶面重构

叶脉重构后,再对其进行叶面重构,即需要对叶面进行网格化。首先从叶脉、叶轮廓上选取叶面关键点构成闭合三角形,如图 8a 所示。再运用德劳内三角划分,最后对叶面进行填充,效果如图 8b 所示。

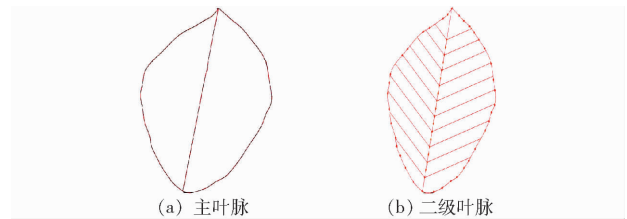


图 7 叶脉重构效果
Fig. 7 Effect diagrams of leaf vein reconstruction

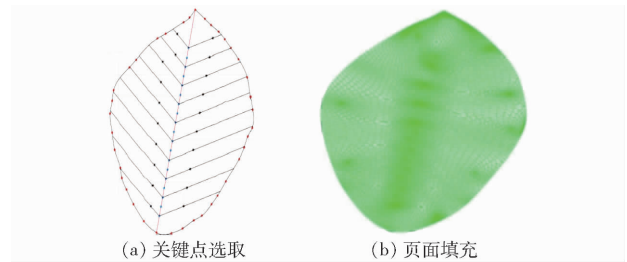


图 8 叶面重构效果
Fig. 8 Foliage reconstruction renderings

本文提出的樱桃叶片重建方法只针对形态结构简单的樱桃叶片,对于多叶片重建或是生长状态下的樱桃叶片重建未进行验证,需后续加以实验验证。

4 结论

(1)利用中值滤波法及经典边缘检测算法处理采集到的樱桃树叶片图像,对其进行灰度转换、滤波、分割,可以有效去除噪声,在有效降低计算复杂度的同时最大程度保存数据真实性。

(2)改进 Harris 角点检测法,通过检测窗口中心点灰度与其周围 n 邻域内其他像素点灰度的相似程度计算灰度之差,进而设定一个阈值,根据阈值范围来提取角点并将其作为轮廓特征点,改进后的算法大大减少计算量,效率得到有效提升。

(3)针对传统 NUBRS 曲线原理重构轮廓无法构成闭合曲面等问题,本文提出一种新的轮廓重构算法。算法将特征点分为左右两部分,利用这些特征点分别重建左右边缘轮廓,最后连接左右边缘轮廓得到完整的叶片轮廓,此方法可有效避免特征点间的相互干扰及无法构成闭合曲面等问题。

参 考 文 献

[1] 于合龙,刘寒静,吴晖霞,等. 纹理植物叶片三维可视化系统设计与试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(10):150-155. YU Helong, LIU Hanjing, WU Huixia, et al. Design and experiment of 3D visualization system for textured plant leaves[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanics, 2016,37(10):150-155. (in Chinese)

[2] DI Shilin, CAO L, GE Y, et al. Visualization methods of 3D plant models: a systematic mapping study[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021:2754343.

[3] NI Z, BURKS T, LEE W. 3D reconstruction of plant/tree canopy using monocular and binocular vision[J]. Journal of Imaging, 2016, 2(4): 28.

[4] BOISSARD P, VALERY P, AKKAL N, et al. Dynamic 3D plant modelling: a morphological and structural approach based upon stereo data acquisition[C]//Modelling in Applied Biology: Spatial Aspects, 1996.

[5] ANDO R, OZASA Y, GUO W. Robust surface reconstruction of plant leaves from 3D point clouds[J]. Plant Phenomics, 2021:3184185.

- extracted by successive projections algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 240 – 250. (in Chinese)
- [16] 殷勇, 王光辉. 连续投影算法融合信息熵选择霉变玉米高光谱特征波长[J]. *核农学报*, 2020, 34(2): 356 – 362.
YIN Yong, WANG Guanghui. Hyperspectral characteristic wavelength selection method for moldy maize based on continuous projection algorithm fusion information entropy[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(2): 356 – 362. (in Chinese)
- [17] 王涛, 喻彩丽, 张楠楠, 等. 基于去包络线和连续投影算法的枣园土壤电导率光谱检测研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 193 – 199, 217.
WANG Tao, YU Caili, ZHANG Nannan, et al. Spectral detection of electrical conductivity in jujube orchard soil based on continuum-removal and SPA[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 193 – 199, 217. (in Chinese)
- [18] TAO C, RIVARD B, SÁNCHEZ-AZOFEIFA A G, et al. Predicting leaf gravimetric water content from foliar reflectance across a range of plant species using continuous wavelet analysis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(12): 1134 – 1142.
- [19] 谭先明, 王仲林, 张佳伟, 等. 基于连续小波变换的干旱胁迫下玉米冠层叶绿素密度估测[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(4): 155 – 161.
TAN Xianming, WANG Zhonglin, ZHANG Jiawei, et al. Estimation of maize canopy chlorophyll density under drought stress based on continuous wavelet transform[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4): 155 – 161. (in Chinese)
- [20] 苗梦珂, 王宝山, 李长春, 等. 基于连续小波变换的冬小麦叶片最大净光合速率遥感估算[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(3): 544 – 552.
MIAO Mengke, WANG Baoshan, LI Changchun, et al. Remote sensing estimation of maximum net photosynthetic rate of winter wheat leaves based on continuous wavelet transform[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(3): 544 – 552. (in Chinese)
- [21] 李长春, 李亚聪, 王艺琳, 等. 基于小波能量系数和叶面积指数的冬小麦生物量估算[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 191 – 200.
LI Changchun, LI Yacong, WANG Yilin, et al. Winter wheat biomass estimation based on wavelet energy coefficient and leaf area index[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 191 – 200. (in Chinese)

(上接第 217 页)

- [6] XIE Z, LANG Y, CHEN L. Geometric modeling of *Rosa roxburghii* fruit based on three-dimensional point cloud reconstruction[J]. *Journal of Food Quality*, 2021(18): 1 – 14.
- [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]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊): 103 – 109.
ZHANG Weijie, LIU Gang, GUO Cailing, et al. Research on 3D reconstruction of apple tree leaves based on 3D point cloud[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 103 – 109. (in Chinese)
- [8] YUAN Z, MIN G, OU S, et al. 3D point cloud surface reconstruction based on divide-and-conquer method in laser scanner[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1544(1): 012118.
- [9] 嵇俊. 基于激光点云的阔叶树叶片重建与形变研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
JI Jun. Reconstruction and deformation of broad-leaved tree leaves based on laser point cloud[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [10] MARTINEZ-GUANter J, RIBEIRO Á, PETEINATOS G G, et al. Low-cost three-dimensional modeling of crop plants[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2883.
- [11] WANG Y, WEN W, WU S, et al. Maize plant phenotyping: comparing 3D laser scanning, multi-view stereo reconstruction, and 3D digitizing estimates[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 63.
- [12] SUN Z H, LU S L X, GUO X Y, et al. Leaf vein and contour extraction from point cloud data[C] // 2011 International Conference on Virtual Reality and Visualization, 2011: 11 – 16.
- [13] HASSAN H, IMAN A M. Plant species recognition using leaf contours[C] // 2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, 2011: 306 – 309.
- [14] 谢秋菊, 苏中滨, 孙红敏. 大豆叶片三维重建及形变技术研究[J]. *农机化研究*, 2011, 33(9): 220 – 223.
XIE Qiuju, SU Zhongbin, SUN Hongmin. Research on 3D reconstruction and deformation technology of soybean leaves[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(9): 220 – 223. (in Chinese)
- [15] VANDANA R, SAHAILJASHUKLA. Spatial and transform domain filtering method for image denoising: a review[J]. *International Journal of Modern Education and Computer Science(IJMECS)*, 2013, 5(7): 41 – 49.
- [16] SHUBHAM S, BHAVESH K, SHRAEY B. Comparative study of image edge detection algorithms[J]. *arXiv:1311.4963*, 2013.
- [17] QI J, YANG H. Research on image segmentation and edge detection technology based on computer vision[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1994(1): 012035.
- [18] QIN X J, JIANG J H, WANG W H, et al. Canny operator based level set segmentation algorithm for medical images[C] // IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering Proceedings, 2007: 892 – 895.
- [19] LUO C, SUN X, SUN X, et al. Improved Harris corner detection algorithm based on canny edge detection and gray difference preprocessing[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1971(1): 012088.
- [20] CHEN G, CHEN B, LIU Y, et al. Research on complex 3D tree modeling based on L-system[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 322(6): 062005.