

李一海,周学成,陈富强. 基于 XCT 序列图像的植物根系三维矢量模型构建方法[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):179-184.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.14.050

基于 XCT 序列图像的植物根系三维矢量模型构建方法

李一海¹, 周学成^{1,2}, 陈富强¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东广州 510642)

摘要:为实现植物根系三维构型参数的原位、无损、准确、快速和自动化测量,提出一种基于 X 射线计算机断层摄影术(X-ray computed tomography,简称 XCT)序列图像的植物根系三维矢量模型构建方法。首先,根据根系的形态特征设计了根结点、根分枝、根系统 3 个基本结构;其次,对植物根系三维体数据(XCT 序列图像)重切以提取根截面,并根据根截面质心和面积构建初始根结点,继而根结点分组以构建初始根分枝,再通过重构根结点、重获根结点面积和根分枝关系判定构建完整的根系统(矢量模型);再次,基于矢量模型设计根数、根长度、根体积、根表面积以及根夹角的计算方法;最后,在 Windows 平台上利用图形用户界面开发工具 Qt、可视化工具包 VTK 和医学图像分割与配准工具包 ITK 实现上述结构和算法,并将上述参数的计算结果与手工测量值进行对比,验证所提出方法的可行性与准确性。

关键词:植物根系;XCT;矢量模型;三维构型

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)14-0179-05

根系是植物赖以吸收养分、水分的重要器官,其构型描述了根系在土壤空间中的分布性状,对植物的吸收能力有着决定性的影响。根系构型的检测与分析方法一直是植物表型检测的重要研究内容,而三维原位构型的自动检测和分析方法是该领域目前亟待解决的一个技术瓶颈。因此,对植物根系三维构型参数进行原位、无损、准确、自动和快速地测量具有重要的意义。挖掘法、钉板法、土钻法以及土柱法等传统根系研究方法均无法满足要求,而借助 X 射线计算机断层摄影术(X-ray computed tomography,简称 XCT)技术则有望实现上述目标^[1]。XCT 技术被应用于植物根系研究已有 30 多年历史^[2-3],但由于成像分辨率低等因素的限制,过去大多数研究都偏向图像分割与可视化方面^[4-6],虽然曾有研究人员基于 XCT 技术测量植物根系构型参数,但效果并不理想^[7]。随着 XCT 技术的发展,其成像分辨率已大大提高,用其对植物根系三维构型参数进行准确的测量已经成为可能,因此近年来基于 XCT 技术测量植物根系构型参数的研究逐渐增多^[8-9]。然而,相关软件的发展并没有跟上 XCT 硬件的发展,目前依然缺乏稳定可靠的基于 XCT 技术的植物根系三维构型参数自动测量系统^[10]。

针对上述背景,并借鉴田绪红等提出的基于横截面算法的三维植物根系图像骨架生成方法^[11]和李骅臻等提出的基于骨架模型的植物根系三维构型可视化方法^[12],本研究提出基于 XCT 序列图像的植物根系三维矢量模型构建方法,并基于所构建的矢量模型实现根数、根长度、根体积、根表面积以及根夹角的自动化测量,该方法的实现将为植物根系三维构

型参数的原位、无损、准确、自动和快速测量提供一个全新的工具,对植物根系的定量研究具有重要意义。

1 植物根系三维矢量模型构建的基本原理

首先,用 160 kV XCT 系统采集根系样本断层序列图像,然后对其进行滤波和分割;其次,将已分割的序列图像读进计算机内存,组成三维体数据,对其重切以提取重切片^[13],根据重切片中各根截面的质心和面积构建初始根结点,并根据根系的形态特征设计算法对上述根结点分组以构建根分枝;再次,对各根分枝进行曲线拟合,以固定间隔采样拟合曲线上的点作为新根心点,并在各新根心点处再次重切(切面与拟合曲线垂直且经过新根心点)三维体数据以获取新根截面,根据新根截面的面积、等效圆半径以及等效圆周长等信息构建新根结点以取代各根分枝的初始根结点;另外,通过判定各根分枝的连通性建立它们的拓扑关系以构建完整的根系统(植物根系三维矢量模型);最后,在上述矢量模型的基础上实现三维构型参数的计算。

2 植物根系三维矢量模型的数据结构设计

为实现上述算法步骤,首先须要设计相应的数据结构。根据植物根系的形态特征,本研究设计了 RootNode、RootBranch、RootSystem 等 3 个基本结构,分别代表根结点、根分枝、根系统。根系统包含根分枝,根分枝包含属于它的根结点列表。

2.1 RootNode

RootNode 包含根结点号(NodeId)、所属根分枝号(BranchId)、根心坐标(Centroid)、法向量(Normal)、面积(Area)、半径(Radius)、周长(Perimeter)、根截面圆率(Roundness)以及根心线在该根结点处的曲率(Curvature)等信息。

在三维空间中用垂直于根分枝生长方向的平面(切面)在特定位置截断该根分枝,将得到 1 个根截面(图 1),然后可

收稿日期:2016-03-18

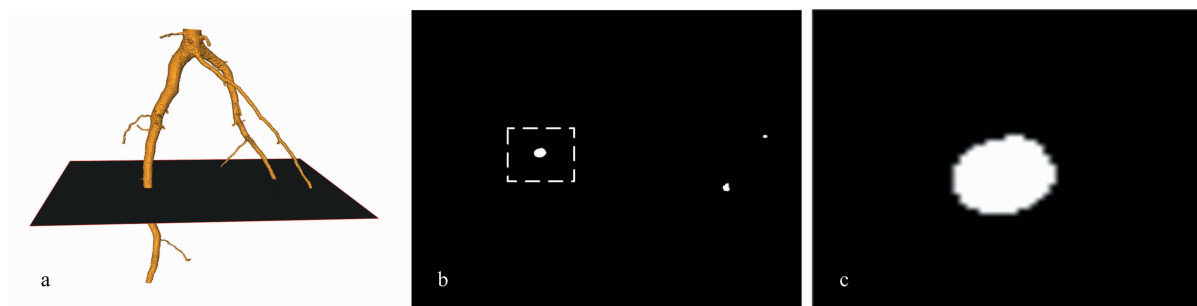
基金项目:国家自然科学基金(编号:31271609);国家“863”计划(编号:2008AA10Z221)。

作者简介:李一海(1989—),男,广东茂名人,硕士,主要从事机器视觉与图像分析理论与应用研究。E-mail:LiYihai2009@qq.com。

通信作者:周学成,博士,教授,硕士生导师,主要从事机器视觉与图像分析研究。E-mail:zxcem@scau.edu.cn。

根据此根截面的质心、面积以及法向量等信息构建根结点,具体方法为将根截面质心进行坐标变换^[14]得到的三维坐标作

为根结点中心(根心点);根结点的法向量取值为该根截面的法向量;根结点面积取值为该根截面的面积。



a—主根系的横切平面(黑色平面);b—切平面上的根截面(虚框内的白色区域即为主根系的横截面);c—放大后主根系横截面(虚框放大后效果,可以看出实际根系的横截面并非标准的圆形区域)

图1 植物根系经平面横切成像后获得的根截面

根据植物根系的形态特征可知,上述根截面的形状近似于圆。为了便于构建三维矢量模型及后续根系参数的测量,本研究将其等效为圆,该圆的面积等于根截面面积,其半径、周长分别为根结点的半径、周长,具体值分别可通过式(1)、式(2)计算:

$$Radius = \sqrt{\frac{Area}{\pi}}; \quad (1)$$

$$Perimeter = 2 \cdot \pi \cdot Radius. \quad (2)$$

式中:Radius 为半径;Perimeter 为周长;Area 为面积。

圆率为上述圆周长与根截面周长之比^[15],如式(3)所示:

$$Roundness = \frac{Perimeter}{Perimeter_{section}}. \quad (3)$$

其中:Perimeter 为等效圆周长;Perimeter_{section} 为根系横截面的实际周长。

2.2 RootBranch

RootBranch 包含根分枝号(BranchId)、父根分枝号(ParentBranchId)、根结点号列表(NodeIds)、子根分枝号列表(ChildBranchIds)等信息。根分枝的构建,主要通过对上述根结点进行分组实现。

2.3 RootSystem

RootSystem 包含所有根结点、根分枝、计算特定根分枝参数(长度、体积以及表面积等)的方法以及计算根系系统整体参数(根总长度、根总表面积以及根总体积等)的方法等。在根分枝的基础上,进一步建立它们的拓扑关系,即可构建完整的根系系统。

3 植物根系三维矢量模型构建方法

主要算法流程如图2所示。

3.1 构建初始根结点

原 XCT 序列图像中各根截面是植物根系的横断面^[16],其质心接近于纵向生长的根分枝中心,但与横向生长的根分枝中心之间存在较大误差。因此,本研究采用基于平行轮廓线的重建方法^[17]对植物根系 XCT 序列图像进行三维重建,然后分别沿 Z 轴、X 轴和 Y 轴 3 个方向对其重切以获取重切片,再根据重切片中各根截面的质心和面积构建初始根结点,重切过程中若刚好切中侧根,也会导致根截面质心和实际根心之间存在较大误差,从而产生根心偏移现象(图3)。经过

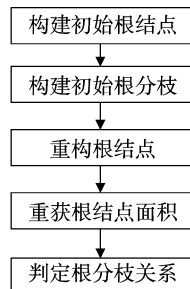


图2 植物根系三维矢量模型算法流程

分析发现,根截面圆率越接近 1.0,其质心与实际根心之间的误差就越小。因此可通过舍去圆率小于特定阈值的根截面以抑制根心偏移现象。根结点的根心效果如图4所示。

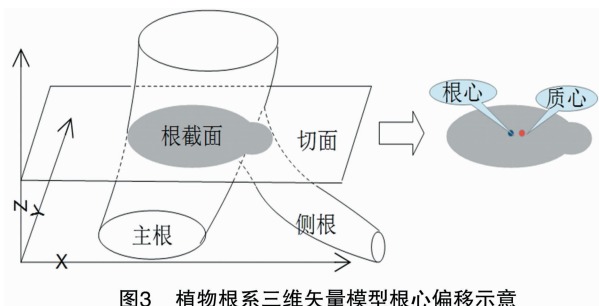
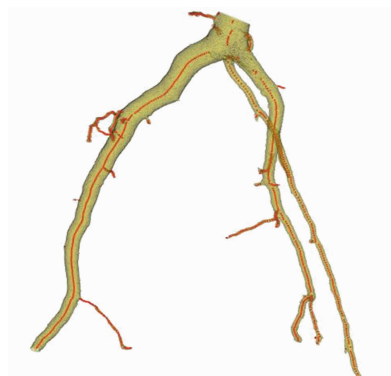


图3 植物根系三维矢量模型根心偏移示意



根系内部红色线条为根结点组成的根心线

图4 根结点集

3.2 构建初始根分枝

通过上述步骤构建了相互独立的根结点,这里进一步根

据最短路径算法的思想^[18],加上连通性、面积变化率以及偏转角等约束条件,对它们进行分组以构建初始根分枝。

连通性:在 2 根结点中心之间作 1 直线段 L_{straight} ,若该线段上的任意坐标点都落在根系体内,则认为这 2 个根结点是直连通的;在 2 根结点中心点之间作满足特定条件的任意抛物线 L_{straight} (抛物线经过这 2 根结点,它的顶点在垂直于 L_{straight} 的平面上且与 L_{straight} 之间的距离不能大于 L_{straight} 长度的 50%),只要其中 1 条抛物线上的任意坐标点都落在根系体内,则认为这 2 个根结点是曲连通。

面积变化率:如式(4)、式(5)、式(6)所示,其中 $area_i$ 和 $area_{i+1}$ 分别是根结点 i 和根结点 $(i+1)$ 的面积, $rate_{\text{area}}$ 为面积变化率。

$$area_{\max} = \max(area_i, area_{i+1}); \quad (4)$$

$$area_{\min} = \min(area_i, area_{i+1}); \quad (5)$$

$$rate_{\text{area}} = \frac{area_{\max} - area_{\min}}{area_{\max}}. \quad (6)$$

偏转角:如图 5 所示, $node_{i-1}$ 、 $node_i$ 、 $node_{i+1}$ 为相邻的 3 个根结点。依次在相邻 2 个根结点之间连接直线所形成的夹角 θ 即为偏转角。

有了上述定义,可将根结点分组的主要步骤描述为(1)若待分组根结点数小于 1 个,则停止分组过程;否则创建 1 个新根分枝,并在待分组根结点中随机选择 1 个作为新根分枝起点,然后将待分组根结点数减 1,记录当前搜索方向为向后的;(2)若当前的搜索方向为向后的,将新根分枝最后 1 个根结点作为当前根结点,否则将新根分枝第 1 个根结点作为当前根结点;(3)在待分组根结点中搜索满足以下条件的根结

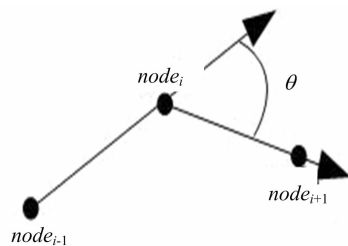
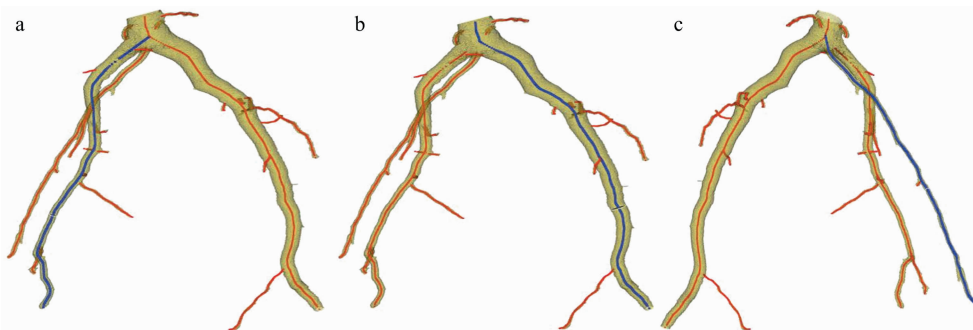


图5 偏转角示意

点作为新根分枝下一个候选根结点:(a)候选根结点与当前根结点之间的距离小于指定阈值;(b)候选根结点与当前根结点是连通的(直连通或者曲连通);(c)候选根结点与当前根结点的面积变化率小于指定阈值;(d)当新根分枝的根结点数 ≥ 2 个时,候选根结点与新根分枝前 2 个根结点所形成的偏转角小于指定阈值;(4)若候选根结点数 ≥ 1 个,则将与当前根结点距离最小的候选根结点作为新根分枝的下一根结点(若搜索方向为向后的,则将新根结点添加到新根分枝最后的位置,否则将其添加到新根分枝最前的位置),然后跳回步骤(2);(5)若候选根结点数等于 0,则分 2 种情况处理,如果当前搜索方向为向后的,则改变为向前的,然后跳回步骤(2);若当前搜索方向为向前的,则结束本根分枝的搜索,并跳回步骤(1)。

分组效果如图 6 所示,其中棕色皮肤为三维重建效果,蓝色点、红色点都是根结点中心(根心点),蓝色根心点被上述算法划分为同一组。由图 6 可见,分组结果与实际根分枝情况一致。



a—一级侧根(较粗)根心点的分组结果(当前分支根系的根心线呈蓝色); b—主根根心点的分组结果; c—一级侧根(较细)根心点的分组结果

图6 植物根系三维矢量模型根心点分组效果

3.3 重构根结点

虽然在构建初始根结点的步骤中剔除了误差较大的根心点,但是为了保证属于同一根分枝的相邻根结点间的距离不至于太大,以便于后续对它们进行分组,保留了误差相对较小的根心点,因此所得的根心点还是会存在一定程度的偏移(图 7-a)。上述根心偏移现象可以通过 3 次 B 样条拟合^[14]来校正。具体方法是各根分枝中除了首末根结点外圆率小于特定阈值的根结点都舍弃,然后用剩余的根结点作为控制点进行 3 次 B 样条拟合,并以特定间隔采样拟合曲线上的点作为新根心点以取代初始根心点(图 7-b),从而构建没有面积的新根结点。由于 3 次 B 样条曲线具有二阶连续性,可以计算曲线在各根结点处的一阶导数和二阶导数^[19],继而计算其曲率^[20],即可分别得到新根结点的法向量(Normal)、曲率

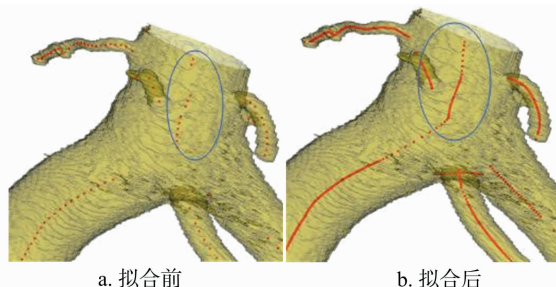


图7 植物根系三维矢量模型根心点 3 次 B 样条拟合前后对比

(Curvature) 值。

3.4 重获根结点面积

上述新根结点的面积须要通过对三维体数据(XCT 序列

图像)再次重切来获得。重切时将切面中心设为根结点的中心,并将切面的法向量设为根结点的法向量,从而使得切面垂直于根分支生长方向。为了避免侧根对根截面积的影响,重切过程中须要舍弃圆率小于特定阈值的根截面。

由于舍去了部分根截面,导致某些根结点无法通过重切获得面积,对于这些根结点,可根据相邻根结点的半径进行线性插值来获得相应的半径,然后用该半径计算其面积和周长。

3.5 判定根分支关系

通过上述步骤构建了相互独立的根分支,这里根据植物根系的形态特征设计算法进一步建立根分支之间的关系,主要有确定分叉根结点和确定根分支关系 2 个任务。

3.5.1 确定分叉根结点的算法步骤 在父根分支中找出所有与子根分支首根结点具有连通性(直连通或曲连通)的根结点作为候选分叉根结点;设置由分叉根结点指向子根分支首根结点的方向向量为 V_d ,子根分支首根结点法向量为 V_f (图 8),它们之间的夹角为 φ (图 8)。依次计算上述各候选分叉根结点的 φ 值,然后选择 φ 值最小的候选分叉根结点作为最终分叉根结点。

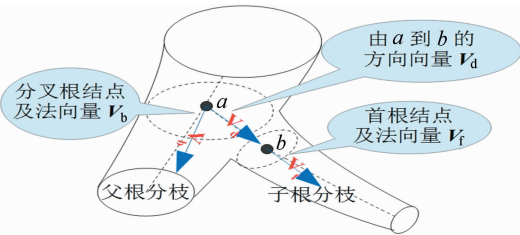


图8 植物根系三维矢量模型分叉根结点示意

3.5.2 判定根分支关系的算法步骤 (1)将第 i (初始值为 0) 条根分支作为当前根分支;(2)调整当前根分支中根结点的存储顺序,使得半径较大的根结点存储在较前的位置;(3)遍历其余根分支,找出与当前根分支首根结点具有指定连通性(直连通或曲连通)的根分支添加到候选父根分支列表中;(4)在当前根分支首根结点与候选父根分支的分叉根结点间作 1 直线段,若该直线段所经过的根分支数大于 2 个,则将此根分支从候选父根分支列表中剔除;(5)比较当前根分支首根结点的面积与候选根分支分叉根结点面积,若分叉根结点面积小于当前根分支首根结点面积,则将该根分支从候选父根分支列表中剔除;(6)在候选父根分支列表中,选择其分叉根结点面积最大的根分支作为当前根分支的最终父根分支;(7)递增 i ,若 $i \geq$ 根分支数则结束搜索,否则返回步骤(1)。

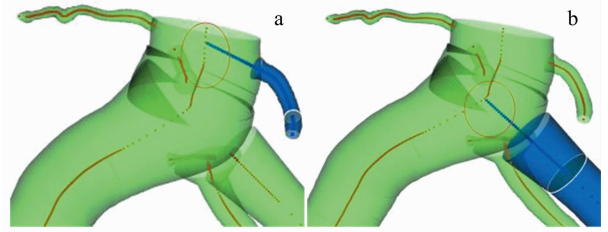
3.5.3 判定效果 如图 9 所示,蓝色根分支为当前选中的根分支,红色圈内蓝色线与红色线相交位置即为其父根分支分叉根结点位置。由图 9 的判定效果可见,由上述算法建立的根分支关系及所确定的分叉根结点位置与实际根系形态一致,取得较好效果。

4 植物根系三维矢量模型基本构型参数计算方法

基于上述步骤构建的植物根系三维矢量模型,可计算根分支数、根长度、根体积、根表面积以及根夹角。

4.1 根分支数

即植物根系三维矢量模型的根分支数。



a—当前侧根(较细)根心线与主根根心线交点(分叉点)的判定结果;b—当前侧根(较粗)根心线与主根根心线交点(分叉点)的判定结果

图9 植物根系三维矢量模型根分支关系与分叉根结点判定结果

4.2 根长度

同一根分支相邻根结点的距离如式(7)所示。式(7)中 (x_i, y_i, z_i) 、 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 分别为第 i 根结点、第 $(i+1)$ 根结点坐标, i 为根结点在根分支中的位置序号,取值为 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$,其中 n 为根分支的根结点数; $D_{(i,i+1)}$ 为第 i 根结点与第 $(i+1)$ 根结点之间的距离。

$$D_{(i,i+1)} = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \quad (7)$$

根分支长度近似为相邻根结点距离 $D_{(i,j)}$ 之和,如式(8)所示。 $D_{(i,j)}$ 越小结果就越接近真实值。

$$L_{branch} = \sum_{i=0}^{n-2} D_{(i,i+1)} \quad (8)$$

4.3 根体积和表面积

同一根分支相邻根结点之间的根段可近似为圆台(图 10),因此可以分别使用圆台体积、侧面积公式计算相邻根结点之间的根段体积、侧面积。

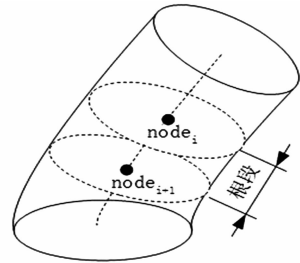


图10 植物根系三维矢量模型相邻根结点之间的根段示意

相邻根结点间根段体积的计算方法如式(9)所示,其中 $h_{(i,i+1)}$ 为相邻根结点之间的距离, r_i 、 r_{i+1} 分别为根分支第 i 根结点、第 $(i+1)$ 根结点的半径, i 的意义和取值同式(7)。

$$V_{(i,i+1)} = \frac{1}{3} \pi \cdot h_{(i,i+1)} \cdot (r_i^2 + r_i \cdot r_{i+1} + r_{i+1}^2) \quad (9)$$

相邻根结点间根段侧面积的计算方法如式(10)所示,其中 i 的意义和取值同式(7), r_i 和 r_{i+1} 的意义同式(9)。

$$S_{(i,i+1)} = \pi \cdot (r_i + r_{i+1}) \cdot l_{(i,i+1)} \quad (10)$$

$$l_{(i,i+1)} = \sqrt{(r_i - r_{i+1})^2 + h_{(i,i+1)}^2} \quad (11)$$

式中: $l_{(i,i+1)}$ 表示当前根段(锥台)的母线长度。

根分支体积和表面积分别为相邻根结点间根段的体积之和、侧面积之和,其计算方法分别如式(12)、式(13)所示:

$$V_{branch} = \sum_{i=0}^{n-2} V_{(i,i+1)} \quad (12)$$

$$S_{branch} = \sum_{i=0}^{n-2} S_{(i,i+1)} \quad (13)$$

4.4 根夹角

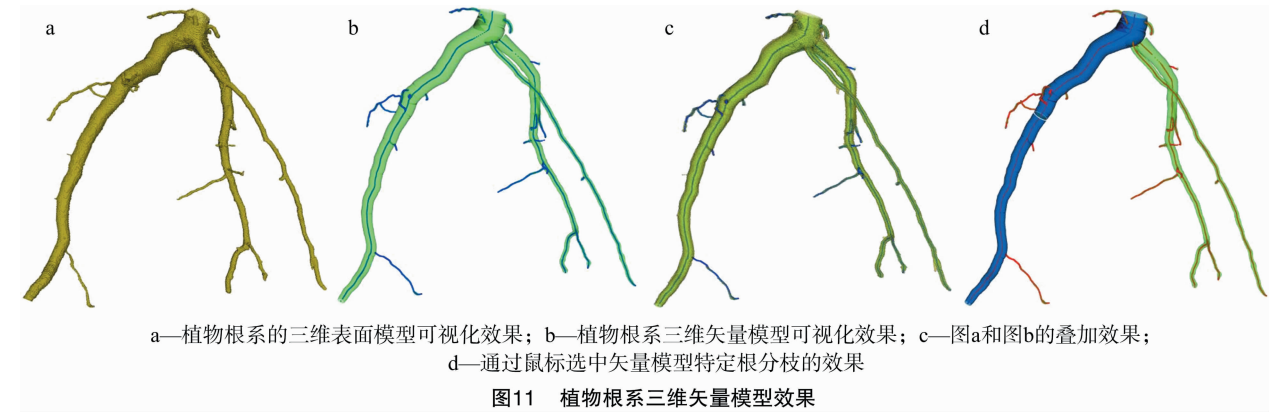
子根分支首根结点法向量 V_f 与父根分支相应分叉根结

点法向量 V_b 的夹角 ψ 即为根夹角(图 8), V_b 与 V_f 的数量积如式(14)^[21]所示:

$$V_b \cdot V_f = |V_b| |V_f| \cos\psi。$$
 (14)

由式(14)可得根夹角 ψ 的计算公式如下:

$$\psi = \arccos(\frac{V_b \cdot V_f}{|V_b| |V_f|})。$$
 (15)



由图 11 - c 可见, 三维矢量模型与三维重建结果是基本重合的, 其整体属性如表 1 所示, 包含了根分枝数 (root branches)、总根长度 (total length)、总根体积 (total volume) 以及总根表面积 (total surface area) 的值, 与手工测量值对比结果如表 2 所示, 误差绝对值小于 7%。

表 1 三维矢量模型 RootSystem 根系属性表

根节点数 (个)	根分枝数 (个)	总根长度 (mm)	总体积 (mm ³)	总表面积 (mm ²)
5 987	23	611.48	5 320.25	4 887.41

表 2 植物根系三维矢量模型总体参数测量结果

项目	根分枝数 (个)	总根长 (mm)	总表面积 (mm ²)	总根体积 (mm ³)
本研究计算值	23	611.48	4 887.41	5 320.25
手工测量值	22	624.60	4 599.38	5 374.81
误差	4.55%	-2.10%	6.26%	-1.02%

图 11 - d 所选中根分枝属性如表 3 所示, 显示了其根夹角 (angle)、根分枝长度 (branch length)、根分枝体积 (branch volume) 以及根分枝表面积 (branch surface area)。分别使用本研究方法和手工方法测量各根夹角, 结果如表 4 所示, 误差绝对值小于 6%。

表 3 三维矢量模型 RootBranch 分支属性表

分枝夹角 (°)	分枝长度 (mm)	分枝体积 (mm ³)	分枝表面积 (mm ²)
0.00	138.19	3 948.41	2 494.89

注: 表中的数据是主根的分支属性值。

6 结论

本研究提出并实现了基于 XCT 序列图像的植物根系三维矢量模型构建方法, 在所构建矢量模型的基础上实现根数、根长度、根体积、根表面积以及根夹角的自动化测量, 将上述自动测量值与手工测量值进行对比得知误差绝对值小于

5 结果与分析

在 Windows 平台上利用图形用户界面开发工具 Qt、可视化工具包 VTK (visualization toolkit) 和医学图像分割与配准工具包 ITK (insight segmentation and registration toolkit) 实现上述结构和算法 (图 11)。

表 4 植物根系三维矢量模型根夹角测量结果

根夹角编号	本方法计算值 (°)	手工测量值 (°)	误差 (%)
1	77.18	80.10	-3.65
2	70.89	69.60	1.85
3	58.79	61.88	-4.99
4	42.17	42.49	-0.75
5	47.48	49.90	-4.85
6	51.34	49.22	4.31
7	95.47	97.93	-2.51
8	48.14	46.97	2.49
9	59.75	59.08	1.13
10	61.33	59.88	2.42
11	69.58	67.47	3.13
12	112.69	111.69	0.90
13	69.39	69.36	0.04

7%, 从而验证了本研究所提出的方法的可行性与准确性。

参考文献:

[1] 孙曰波, 赵从凯. 根系研究方法进展[J]. 潍坊高等职业教育, 2009, 5(1): 52-55

[2] 罗锡文, 周学成, 严小龙, 等. 基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 104-106.

[3] Mooney S J, Pridmore T P, Helliwell J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil[J]. Plant Soil, 2012, 352(1/2): 1-22.

[4] 周学成, 罗锡文. 基于遗传算法的原位根系 CT 图像的模糊阈值分割[C]//中国农业工程学会学术年会论文摘要集. 大庆, 2007: 110.

[5] 陈郁淦, 周学成, 罗锡文, 等. 基于 ITK 和 VTK 的原位根系三维可视化研究[C]//中国农业工程学会学术年会论文集. 重庆, 2011: 1164-1168.

[6] 李克新, 李沐阳, 薛 瑞, 等. 林木幼苗根系 CT 序列图像分割[J]. 森林工程, 2014, 30(1): 25-29.

王健,谢南,黄春营. 基于模糊控制理论的温室葡萄种植灌溉算法[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):184-188.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.14.051

基于模糊控制理论的温室葡萄种植灌溉算法

王健¹, 谢南¹, 黄春营²

(1. 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 天津大学软件学院, 天津 300072)

摘要:结合温室环境下葡萄的需水特点提出上限灌溉和下限灌溉2种灌溉方式,同时结合葡萄生长周期及环境因素,给出一种运用模糊控制理论动态调节灌溉量并预测下次灌溉时间的智能控制算法,在不影响产量的基础上保证水资源的最大利用率。结果表明,该方法最大超调量为20%,响应时间为22 s,具有较高的稳定性与响应速度,与人工控制方式相比,在产量基本不变的条件下可达到节约17%水资源的效果,为葡萄自动化灌溉开辟了一条新途径。

关键词:葡萄种植;生长周期;动态调节;模糊控制;灌溉预测;算法;自动化灌溉

中图分类号: TP273⁺.5;S126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)14-0184-05

温室智能灌溉是通过传感器采集环境信息,对信息进行科学分析,并根据分析结果提供一套完整的灌溉方案。温室智能灌溉在互联网技术、通信技术、传感器技术的高速发展下得到可靠的技术支持^[1-2],在节省人力物力的情况下实现高产,改变了人们的传统种植方式,得到世界范围内的高度关注。以色列、美国、荷兰等发达国家始终将农业现代化、提高水资源利用作为研究热点,并已达到相当高的水平,基本形成温室农业的高投入、高产,温室电脑覆盖率达到80%以上,主流智能灌溉方式及系统^[3-5]应用程度高很大程度提升了农业生产效率。我国是传统的农业大国,农业现代化水平与发达国家相比存在较大差距,实现农业现代化、提高灌溉技术的精准度及水资源利用效率成为当务之急^[6-7]。

温室葡萄突破传统种植过程中受气候、地域等因素的制

约,使葡萄生长在适宜的土壤、气候环境中。但目前温室内多以人工控制为主,通过滴灌、微喷灌等方式进行补水,自动化普及程度相对较低,缺乏符合葡萄生长周期需水特性的自动灌溉控制算法,在葡萄生长过程中会发生短暂缺水、过量灌溉的现象。因此,本研究以模糊控制理论为基础,结合5年生巨峰葡萄各时期生长周期的需水特性与环境因素,提出一种动态调节灌溉量的控制算法,在考虑巨峰葡萄不同生长周期所需空气温湿度及土壤相对湿度的情况下,判断是否需要进行灌溉,预计下次灌溉时间,以减少系统耗能及水资源的浪费,在不影响葡萄产量的基础上保证水资源的最大利用率。

1 基本知识

葡萄(*Vitis vinifera* L.)为葡萄科葡萄属木质藤本果树,整个生长周期大体划分为生长期、休眠期2个部分。生长期是葡萄生长的关键时期,持续160~200 d,可细分为伤流期、新梢生长期、开花期、果粒膨大期、果粒成熟期(着色期)及落叶期6个时期。休眠期同样对葡萄的生长起至关重要的作用,

收稿日期:2016-06-03

作者简介:王健(1976—),男,黑龙江克山人,硕士,副教授,硕士生导师,从事嵌入式开发、物联网、信号与信息处理等研究。
E-mail: wang1342@foxmail.com.

- [7] Heeraman D A, Hopmans J W, Clausnitzer V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-Ray computed tomography[J]. Plant and Soil, 1997, 189(2): 167-179.
- [8] Koebernick N, Weller U, Huber K, et al. In situ visualization and quantification of three dimensional root system architecture and growth using X-ray computed tomography[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(8): 1-10.
- [9] Metzner R, Eggert A, Dusschoten D V, et al. Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: potential and challenges for root trait quantification[J]. Plant Methods, 2015, 11: 1-11.
- [10] Kuijken R C P, van Eeuwijk F A, Marcelis L F M, et al. Root phenotyping: from component trait in the lab to breeding[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(18): 5389-5401.
- [11] 田绪红, 李志垣, 韩国强, 等. 基于横截面算法的三维植物根系图象骨架生成方法[C]//第十二届全国图象图形学学术会议论文集. 北京, 2005: 655-658.
- [12] 李骅臻, 周学成, 张常玲, 等. 基于骨架模型的植物根系三维构型

- 可视化方法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(11): 3913-3917.
- [13] 周振环, 伍云智, 赵明. 医学图像编程技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [14] Hearn D, Baker M P. 计算机图形学[M]. 蔡士杰, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [15] Lehmann G. Label object representation and manipulation with ITK [J/OL]. Insight Journal, 2008, 1-34. <http://www.insight-journal.org/browse/publication/176>
- [16] 周振环, 郑小中, 赵明. 三维图像编程实验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [17] 张俊华. 医学图像三维重建和可视化——VC++实现实例[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [18] 程杰. 大话数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [19] 江本赤. B样条曲线曲率简易求解算法[J]. 制造技术与机床, 2014(10): 78-79.
- [20] 张学东. 空间曲线的曲率计算方法[J]. 塔里木农垦大学学报, 2002, 14(2): 37.
- [21] 方明亮, 郭正光. 高等数学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2008.