

与环境交互的根系动态生长可视化算法

杨 猛^{1,2} 肖 成¹

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083;
2. 国家林业和草原局林业智能信息处理工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为结合环境因素进行植物根系三维建模,分析根系生长机理,提出了一种模拟根系与环境交互的动态生长可视化算法。该算法以根尖与环境的交互为主导,首先计算每个根尖吸收到的养分含量,再根据内部资源分配机制并采用环境影响的缩放函数调节根尖的伸长率与侧根密度,同时结合所受到的向性与障碍物的阻挡因素,实时调整生长方向。提供了根茎形状与根系整体形态的控制方法,包括编辑根茎形状的模板曲线、设定资源分配权重和向性权重等。对不同类型的根系,以及不同土壤环境下(包括各种养分分布、障碍物与盆壁影响)的根系进行了模拟实验。实验结果表明,所提出的算法具有为多类植物根系建模的泛化能力,并且能够合理地表现与环境的交互过程。

关键词: 植物根系; 三维模型; 生长模拟; 环境交互; 可视化

中图分类号: TP391.9; Q945.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0275-07 **OSID:** 

Visualization of Growing Dynamically of Root System Interacting with Environment

YANG Meng^{1,2} XIAO Cheng¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Engineering Research Center for Forestry-oriented Intelligent Information Processing, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: Visual simulation of root system growth, an important approach to analyze the root system growth mechanism affected by the surrounding environment, is a significant task in the fields of computer graphics and botanical research, especially in agriculture and forestry. A modeling approach was presented to simulate the interaction between root system growth and the environment. This approach was dominated by the interaction of the root tips with the environment, and regulated by an internal resource allocation mechanism. Firstly, the nutrients absorbed by each root tip were calculated, and then the elongation rate and lateral root density of the root tip were regulated through internal resource allocation mechanism and the scaling function of environmental influence, while adjusting the growth direction of the root tip in real time by considering the blocking factors of the tropisms and obstacles. In addition, the approach provided several ways to control the shape of a root stem and its overall morphology of the root system, including editing the template curve, setting resource allocation weights and directional weights, etc. In the experiments, the root systems of different species were firstly simulated, followed by simulations of root systems in different soil environments, including various nutrient distributions and the influence of obstacles and pot walls. The results showed that the proposed approach had the ability to generalize the realistic models for multiple types of root systems for plants, while effectively representing a reasonable interaction response with the environment in a real-time way.

Key words: root system; 3D model; growth simulation; environment interaction; visualization

0 引言

根系能够确保植物水和养分的获取,在植物生长中发挥至关重要的作用。种类繁多的根系是植物应对各种极端环境(如干旱或营养不良)的重要组成部分^[1-2]。由于根系隐藏于地下,缺乏直接观测的技术,因此结合环境的三维根系生长模拟是多类研究的重要工具。

对于根系功能与发育的模拟是包括计算机图形学在内的不同领域的研究热点。在根系建模研究早期,DIGGLE^[3]提出根系的拓扑结构与每级拓扑结构下根的特性。文献[4-5]开发了新的根系可视化生长模型,主要在二维平面上模拟了根的产生、轴向与径向生长、分支、衰败与脱落等多种发育过程。随后,根系建模的工作中开始更多的考虑到土壤环境对根系生长产生的影响,文献[6-7]的建模工作中,将向地性、无机盐与水分等各种环境影响引入根系生长,使根系建模拓展成动态的生长过程。在此基础上,SCHNEPF 等^[8]开发的开源根系建模框架CRootBox,包含了一个能任意耦合环境的接口,用户能够构建更为复杂的土壤环境,并使根系在其影响下进行生长。杨乐等^[9]利用微分 L-系统实现了根系动态生长模拟可视化,并加入双尺度自动机以连续的方式描述了水稻根系的生长^[10],但缺乏与环境

的交互过程。

目前根系可视化建模方面的研究专注于根系的架构表达,在根茎细节以及整体形态特征上关注较少,且在三维图形表示方面较为欠缺,根系建模的通用能力较弱。同时根系三维建模要考虑土壤环境的复杂性,如不同种类无机盐的影响效果不同^[11]、无机盐分布不均匀^[12]与土壤障碍物影响^[13]等,本文就此问题提出一种能够与环境合理交互的根系动态生长可视化算法。

1 算法概述

以直根系、须根系和储藏根系作为主要模拟对象(根系特点^[14]见表1),并能够使其对诸如重力、水分、养分与障碍物等环境因素做出反馈。该算法包括过程建模与环境交互。算法的主要流程如图1所示。

表 1 主要模拟的根系类型与特点
Tab.1 Main simulated root system types and characteristics

根系类型	特点
直根系	主根明显而发达,且方向为竖直向下,侧根呈放射状分布于主根周围
须根系	主根不明显,从茎基部产生大量须状细根,以致所有的根呈须状分布
储藏根系	主根的外形肥大,用于储存养料和水分

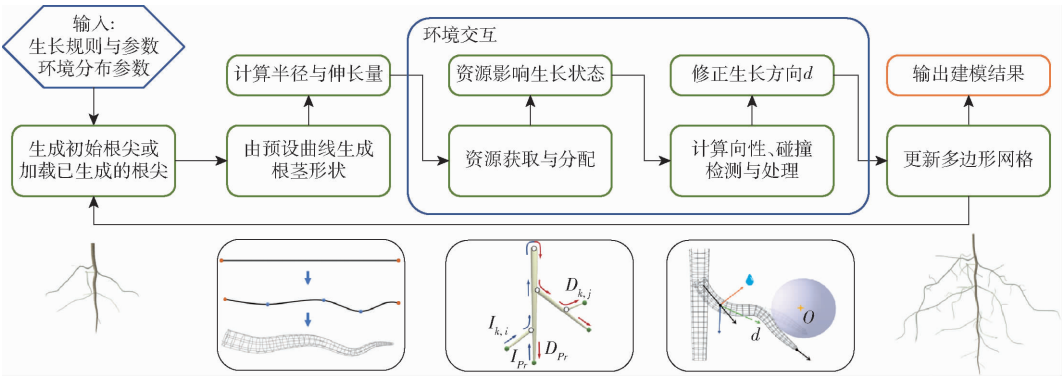


图 1 算法概述

Fig.1 Algorithm overview

过程建模确定了组成一个根系的各个分支的生长模式和拓扑结构。考虑了自然生长模式以及几何模型的绘制。环境交互能够使根系在土壤中呈现合理的生长趋势,包括根系的生理特性以及物理特性。

2 过程建模

考虑到根系种类之间的差异与形状的多样,基于上下文相关 L-系统^[15]的过程建模方法,定义了一种有效描述各种根系结构及其特征的语法,并以此来约束生长过程与根茎之间的拓扑关系。此外,增加了用户对 3D 模型形状与图形绘制的控制功能,

完善了根系细节上的视觉效果。

2.1 语法定义

L-系统是基于具有递归结构的生长规则,它通过定义一套规则并迭代执行来模拟复杂植物的几何表示与拓扑结构。定义规则的一次迭代周期时长为 T ,每个周期会生成一系列的节间点,如图2所示。图中, $L_{k,i}$ 表示层级为 k 且序号为 i 的侧根, $k \geq 0, i \geq 0$,当 $k=0$ 时,代表主根。 $p_{k,i}^j$ 为组成该侧根的节间点,其中 j 为点序。侧根 $L_{k,i}$ 经过了 3 个周期的生长,分别产生了 4 个节间点与 2 个侧根。每个侧根都是在其父根的基础上加入其侧根信息(轴向夹

角、径向夹角与分支数量等)确定而成。

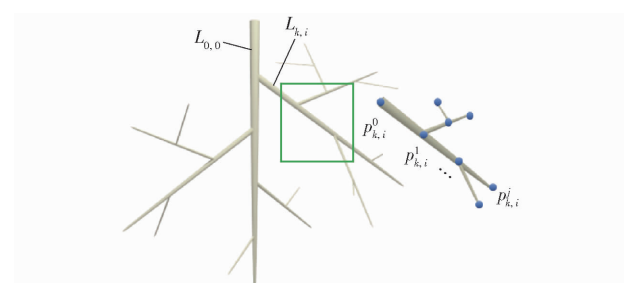


图 2 根系层次结构图

Fig. 2 Hierarchical structure of a root system

为了控制根系的更多细节,采用一个三元组 G 来定义一个根系结构

$$G = \{A, P, \omega\} \quad (1)$$

式中 A ——起始字符 P ——生长规则
 ω ——初始生长参数,如起始伸长量、半径或随机弯曲值等

A 作为该模块的初始字符,使用生长规则 P 进行迭代,规则表示式为

$$P \rightarrow P_{lc} \langle m, n, \alpha \rangle P_{rc} \quad (2)$$

式中 P_{lc} ——一个生长周期产生的结构

P_{rc} ——下一个生长周期的结构

m ——侧根的模块标识符

n ——侧根数量

α ——侧根轴向夹角

P_{lc} 、 P_{rc} 常用于表示生长一段根茎或者自身调用,比如生成图 2 中的 $p_{k,i}^j$ 。而尖括号内部的则是该模块的侧根结构信息。

2.2 可编辑根茎

过程建模方法用于生成根系的拓扑结构与根茎的节点,但利用这些节点生成的几何输出由直线构成,不符合实际根系弯曲的特点。因此,在特定的建模情况下,需要指导根茎在 3D 空间中遵循预定义的曲线生长。例如,用户想要自定义一个根的形状。在细节上,有研究者采用样条曲线表示枝条的弯曲形状^[16-18],也有研究者结合草图控制树枝的形状^[19-20]。

本文基于这些研究,提出模板曲线的方法,利用单根的轴向方向与模板曲线控制该根的形状。假定一条长度为 1 的曲线用来表示总长为 l 的根的形状,根尖从萌发处以萌发方向为轴向方向,在归一化指标为 $1/l$ 的轴曲线上移动,其中,根尖在任意位置的生长方向都是曲线对应点的曲线斜率。首先由用户指定点集 $V = \{p_0, p_1, \dots, p_m\}$,随后对该点集采用三次样条曲线拟合,公式为

$$B_j(\delta) = \sum_{i=0}^3 p_{j+i-1} C_3^i \delta^i (1-\delta)^{3-i} \quad (3)$$

式中 $B_j(\delta)$ —— $p_j \rightarrow p_{j+1}$ 段的拟合曲线

δ ——归一化移动距离, $0 \leq \delta \leq 1$

C_3^i ——以 3 为底 i 的组合数

一段三次样条需要 4 个点确定,所以当拟合边界点 ($j=0$ 或 $j=m$) 时, $j+i-1$ 最小值为 0,最大值为 m 。这个步骤设置的曲线将用于指导根系内特定模块或者根茎的生长,如图 3 所示。

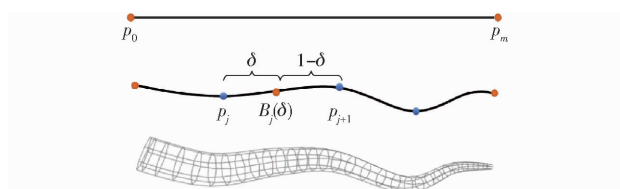


图 3 模板曲线设置与应用

Fig. 3 Template curve setting and its application

图 4a 为图 2 中的简单直线结构中不同层级的根应用一组模板曲线后生成的结构。此外,根在生长路径中还可以插入一些随机偏移量,将不规则性引入根系的生长过程,以产生自然弯曲的形状,如图 4b 所示。

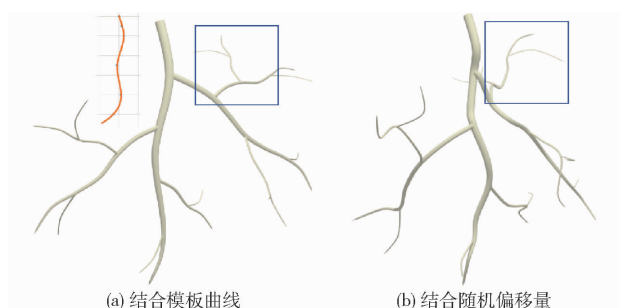


图 4 简单递归结构的自然弯曲

Fig. 4 Natural bending of simple recursive structures

2.3 三维几何模型离散表示

为了在细粒度上显示根茎不规则形状的曲率,根茎长度必须足够短,且横切面多边形必须有足够的边。然而,该过程可能需要大量的运算来计算各个顶点的位置,也需要占用更多的内存来存储这些顶点,这将导致实时动画的帧数降低。为此,增加了 2 个参数 n_{slice} 与 n_{side} ,分别控制输出几何体的曲面与曲线的步长。

如图 5 所示,随着曲线步长的增加,根茎的曲线曲率精度也会增加,至于茎段顶点圆的边的数量,决定了构成该几何体所需的顶点总数。根茎曲线的曲率精度与顶点圆分片数量的提升导致计算量增大。

3 交互算法

根系是由一组具有不同生长状态的根尖进行拓展、分支而来,所以根尖被称为根系生长的引擎。根系与环境交互体现在 2 处:①根系的发育状况取决于所获取的资源是否丰富,如养分和水分的含量;同

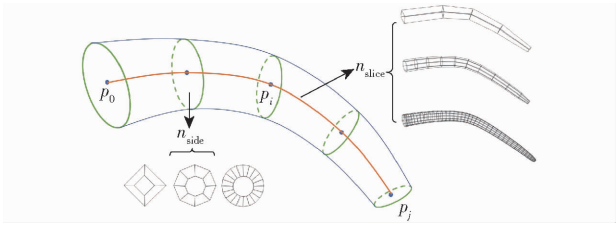


图5 分支几何模型曲线步长设置

Fig. 5 Geometric curve setting of a branch

时,根系更好的发育又能获取更多的资源,从而进一步生长,包括根尖伸长量的增大与侧根密度的增加。②根系的生长受到环境影响,包括重力影响、水分与养分浓度差或者障碍物阻碍。

为了模拟这些因素对根系生长的影响,本文为根系的每个生长周期构建了3个阶段,首先考虑根尖对资源获取与分配情况,然后计算各个根尖的资源分配量对其生长状态产生的缩放比。最后,根据根尖所在区域的环境信息,计算出对根尖最有利的伸长方向并开始生长。

3.1 养分获取与生长资源分配

土壤中的营养物质分布不均,根系获取的养分在整个植物的生长过程中非常重要。为此,植物可以调节根系在土壤中的生长状态,使根系往养分高的地方觅食^[12]。BH模型最初被作为一种内部调控机制提出,而后由PALUBICKI等^[21]拓展,该方法通过内部信号机制调节植物在空间或资源上的竞争,从而控制植物茎段的局部几何形状。结合这种方法,本文提出了根系资源分配算法。该算法利用根尖吸收的养分量来指导资源分配。比如控制大部分资源流向轴根或者侧根。

在每个生长周期,根据根系当前的结构与环境信息,再利用根尖吸收到的资源量来引导资源的分配。根尖吸收其所处区域的资源,并在根轴处记录该根的资源吸收总量,再将资源汇入其父根,递归该过程,直到汇入主根的根轴(图6a)。然后根据每个侧根的养分吸收量计算分配的资源量(图6b)。对于一个侧根,其资源分配公式为

$$D_{k,i} = (I_{Pr} + I_{k,i}) \frac{(1 - \lambda_k) I_{k,i}}{I_{Pr} + (1 - \lambda_k) I_{k,i}} \tag{4}$$

式中 $D_{k,i}$ ——侧根 $L_{k,i}$ 分配到的资源量

I_{Pr} ——父根的资源吸收量

$I_{k,i}$ ——侧根 $L_{k,i}$ 的资源吸收量

λ_k —— k 级侧根的资源分配权重, $0 \leq \lambda_k \leq 1$

用户可以调节该分配权重来指导资源的流向,主要用于调节不同养分对主根和侧根影响的相对程度。 λ_0 默认值为 0.5,表示吸收量与分配量一致,该根生长状态并不受影响,而该权重大于 0.5 则促进

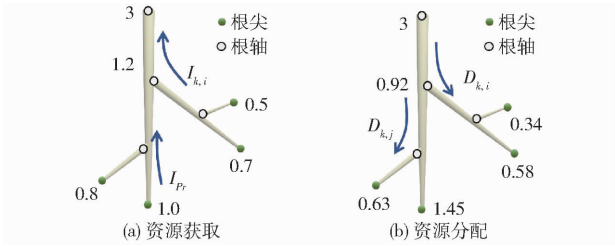


图6 根系资源获取与分配($\lambda_0 = 0.6, \lambda_1 = 0.55$)

Fig. 6 Root resource acquisition and allocation
($\lambda_0 = 0.6, \lambda_1 = 0.55$)

该根发育,反之抑制。比如自然界中有的物种主根强壮,则可将较大分配权重分配给主根;而有的物种侧根发达,则将主根分配权重减小。这也是用户控制根系整体形状的一种方式。

3.2 生长状态计算

在KOEVOETS等^[12]的研究中,详细介绍了不同养分的不同含量对根系生长的影响,对根系的生长状态(如伸长量、侧根生长角度与侧根密度等)均有不同程度的影响。以生长规则中所定义的结构作为根系在默认环境中的生长结果,并将水分、各种养分分别看作一种环境因素。为了使得根系能够耦合不同环境条件且呈现出合理的生长变化,提出了一种用于结合多种环境因素的缩放算法。利用根尖所在区域的资源含量与生长资源分配公式来得到根尖的生长资源分配量,进而计算该根尖的生长促进率。

首先,定义环境因素及其缩放函数,由各个根尖的资源分配量作为自变量,来调控根尖的生长状态。缩放函数表示特定根系在特定养分的不同含量下的生长状态,参数可以由用户实际测量后设定。

然后对加入的所有环境因素返回的同一影响类型的缩放值进行求积,返回结果来缩放根尖的状态,大于1呈促进作用,小于1呈抑制作用。公式为

$$S_{type}(c) = \prod_{i \leq k} F_i : \phi_{type}(c) \tag{5}$$

式中 $S_{type}(c)$ ——所有环境因素对生长状态的缩放函数

c ——资源浓度

F_i ——序号为 i 的环境因素

$F_i : \phi_{type}(c)$ ——环境因素 F_i 对生长状态的缩放函数

以下将各类缩放值应用于根系中。

(1) 单根伸长

只要根系年龄小于根系生存期,单个根就会生长。对于侧根 $L_{k,i}$,它的默认生长速度是一个特定的负指数生长函数,萌发时刻生长速度继承其父根。在受到环境影响后,生长速度变化公式为

$$v_{k,i}(t,c) = S_{el} v_0 e^{-\frac{r_0}{l_{max}} t} \tag{6}$$

式中 $v_{k,i}(t,c)$ ——侧根 $L_{k,i}$ 的根尖在 t 时刻且浓度为 c 的条件下的生长速度
 S_{el} ——环境对伸长量的缩放值
 v_0 ——初始生长速度
 l_{max} ——单根的最大长度

式(6)表明,除了环境因素影响外,根的伸长速度也是以根的年龄为变量的函数,随着时间增长而减小,直到生长结束。

(2)侧根产生

侧根是在一个根顶端成熟后形成的分支区域内产生的。在分支区域内,将创建规则中指定的侧根量,同时遵循着规则中描述的拓扑结构。受到环境影响后,侧根与父根的轴向与径向旋转角公式为

$$\alpha' = S_{ang} \alpha \tag{7}$$

$$\beta_i = \frac{2 \pi i}{S_{br} n_{br}} \tag{8}$$

式中 α' ——受环境影响后的轴向旋转角
 α ——受环境影响前的轴向旋转角
 i ——侧根序号
 β_i ——序号为 i 的侧根受环境影响后的径向旋转角
 S_{ang} ——环境对侧根轴向夹角的缩放值
 S_{br} ——环境对侧根数量的缩放值
 n_{br} ——受环境影响前的侧根数量

3.3 生长方向计算

环境除了影响根系的生长状态外,也会由于根尖周围环境的差异对生长方向进行调整。首先是向性,指根系的某一根尖朝向某一方向或者远离某一方向的趋势。再者就是障碍物,根在生长过程中不断进行碰撞检测,当与障碍物发生碰撞时,调整根尖生长方向。

(1)向性

常见的向性包括向地性、向水性与向化学性。向地性固定,总是驱使根尖向下生长,向水性与向化学性类似,考虑土壤中水分浓度不同,在根尖感知到周围环境后趋向浓度高的方向生长。

假设环境中产生的每个向性均为根尖提供一个生长方向的偏移,而这些偏移结合后产生最终的方向偏移。作用于根尖的所有向性汇总后得到新的生长方向 d ,计算公式为

$$d = w_s d_0 + (1 - w_s) \frac{\sum w_i \tau_i}{\sum w_i} \tag{9}$$

式中 d_0 ——受环境影响前的生长方向
 w_s ——根系自身方向的权重

τ_i ——序号为 i 的向性

w_i —— τ_i 的权重

根尖受影响前的生长方向,取决于给定的分支角与根尖萌发位置,而其他向性与其权重乘积后求和汇总得到环境因素的干扰方向,并且 $\sum w_i < 1$,如图 7 所示。此外,向性权重也是用户控制根茎形状的一种方法。

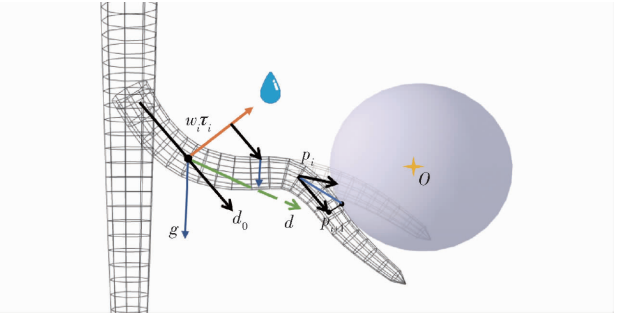


图 7 由多种向性以及障碍物影响的生长
Fig.7 Growth affected by tropisms and obstacles

(2)障碍物

在每个生长周期开始时,假设根尖可以生长到之前步骤中计算的新位置。在实际的几何图形被绘制之前,检查这段新生的根是否与环境中的几何体发生了碰撞。首先快速检测这段根茎的 OBB 包围盒是否发生碰撞。如果发生碰撞,将该根尖状态标记为“碰撞中”,而后在每个时间步长中动态调整根茎的方向。图 7 中,以 p_i 为起点,在时间步长 Δt 后在 p_{i+1} 处与障碍物发生碰撞。这时,将 p_{i+1} 绕 p_i 旋转,碰撞处理后的新根尖位置公式为

$$R_{Op_{i+1}} = R_o + r_{p_{i+1}} \tag{10}$$

式中 $R_{Op_{i+1}}$ ——障碍物中心到新根尖位置的距离
 R_o ——障碍物中心到交互点的距离
 $r_{p_{i+1}}$ ——根茎在 p_{i+1} 处的最大半径

式(10)的目的是在障碍物表面寻找一个点,该点刚好与根茎相切,并且满足调整后的根茎长度与调整前一致。

4 实验与结果分析

采用 WebGL 进行渲染。所有例子都是在处理器 i7-9700 3.00 GHz,16 GB 内存,图形显卡为 UHD Graphics 630 的实验环境下完成。

实验首先分析提出的算法能否以简单有效的方式模拟自然界中各类常见植物的根系,并验证该可视化算法在多组细节精度上的建模效率。最后验证模拟的根系能否与环境发生合理的动态响应,包括根系对养分的响应以及在 2 种障碍形式下的表现。

重要参数描述以及设置如表 2 所示。用户可以为不同植物的根系设定不同的参数,如长度、半径与

生长偏移量来控制根系模型的形态,通过设定不同的资源分配权重与向性的权重来调节根系受环境的影响程度。

表 2 主要参数

参数	数值
最大生长周期 n_T	[1,10]
初始生长速度 $v_0/(\text{cm}\cdot\text{T}^{-1})$ (T 为周期)	[1,50]
主根最长伸长量 l_{max}/cm	[1,1 000]
主根最大半径 r_0/cm	(1,100)
根尖自身方向权重 w_s	[0,1]
重力向性权重 w_g	[0,1]

首先,测试了不同细节精度的三维根系的生长模拟动画效率,如图 8 所示,在 3 种不同分辨率下生成了具有相同生长步长的根系模型,该模型最终产生的侧根数量为 344。表 3 给出了每个分辨率的效率结果。分别测定了每个分辨率根系模型生长动画的速度(f/s)与最终模型占用存储空间。高精度下以平均速度 48 f/s 生成虚拟根系,验证了实时生长的动画效率。

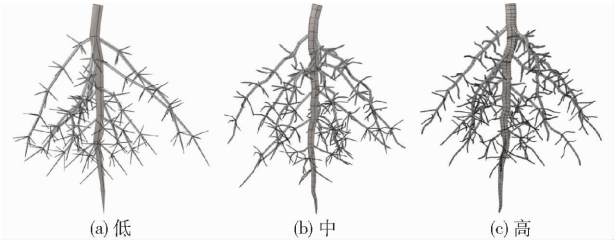


图 8 不同分辨率的根系模型

Fig. 8 Root models with different resolutions

表 3 不同细节精度下的渲染速度

精度	顶点总数	占用存储空间/MB	动画速度/ $(\text{f}\cdot\text{s}^{-1})$
低(图 8a)	12 960	0. 9	58
中(图 8b)	48 480	4. 2	54
高(图 8c)	122 136	12. 5	48

实验中的参数设定如表 4 所示,由于本文主要研究通用性的可视化模拟算法,所以实验中与根系

相关的参数,如最大伸长量、主根半径、生长速度与生长偏移量等数值设置均为经验数据,同时从一定程度上考虑了视觉效果。

表 4 实验图中的参数设置

参数	图 9a	图 9b	图 9c	图 9d	图 10b~10d
n_T	9	7	7	7	7
$v_0/(\text{cm}\cdot\text{T}^{-1})$	5	2	2	4	5
l_{max}/cm	30	10	10	20	30
r_0/cm	1. 6	0. 5	0. 3	4	1
w_s	0. 8	0. 6	0. 5	0. 7	0. 5
w_g	0. 2	0. 4	0. 4	0. 3	0. 2

在图 9 中,分别模拟了直根系、须根系与储藏根系 3 种类型根系的生长。使用几行简单的规则很容易生成各类根系模型,通过调节少量参数与设定模板曲线(图 9c),可以产生预期的根茎形状。由于在生成过程中应用了随机生长偏移量,很容易形成具有自然弯曲效果的仿真模型。

随后,以向日葵为例,其根系是由一组简单生长规则描述的直根系类型。图 10a 为一个传统过程建模结果,其自然弯曲和根茎形状可以由用户设定少量可调整参数即可实现。而需要对该模型的其他方面改变时,必须重新设定复杂的规则^[22]或者更改大量参数^[6,8]。相比之下,本文的算法提供了对侧根密度、伸长量与生长趋势的自动控制。只需要设定环境资源分布参数与资源分配权重,即可得到不同的生长结果。

为了证明该算法的有效性,首先为环境加入重力因素。随后,分别模拟了自然界中氮元素与磷元素在土壤中的分布,结合资源分配公式与向性算法,生成结果如图 10b、10c 所示。其中,将适量浓度设定为 0,即不对根系产生影响,而正值表示促进,负值表示抑制。营养物质的分布是不均匀的,往往具有很强的垂直分布特点^[12]。磷酸盐容易在土壤表层积累^[23],图 10b 模拟了这一分布,为了获得更多

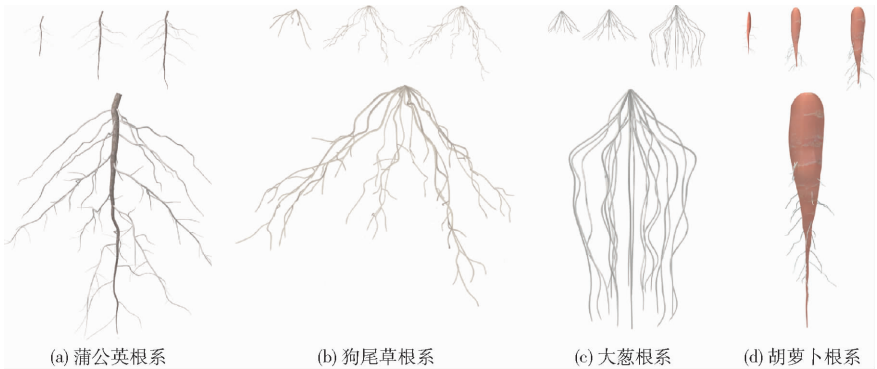


图 9 不同种类根系的模拟结果

Fig. 9 Simulation results of different kinds of root systems

的磷酸盐,将侧根的权重 λ_1 设置为 0.7,这将有利于浅层侧根更高的伸长量与更高的侧根密度;此外,由于养分浓度差,根系呈现出向上生长的趋势。氮元素具有高流动性,往往渗透到了更深的土壤中。主根的资源分配权重 λ_0 设为 0.65,这将有利于根

系深入土壤,图 10c 模拟了这种分布状况,所以呈现主根伸长量增加,浅层侧根密度与伸长量降低的特点。除此之外,图 10d 模拟了不规则的水分分布。受水源影响的根呈现明显的向水性,由于左侧的侧根吸收到的资源非常低,所以生长受到抑制。

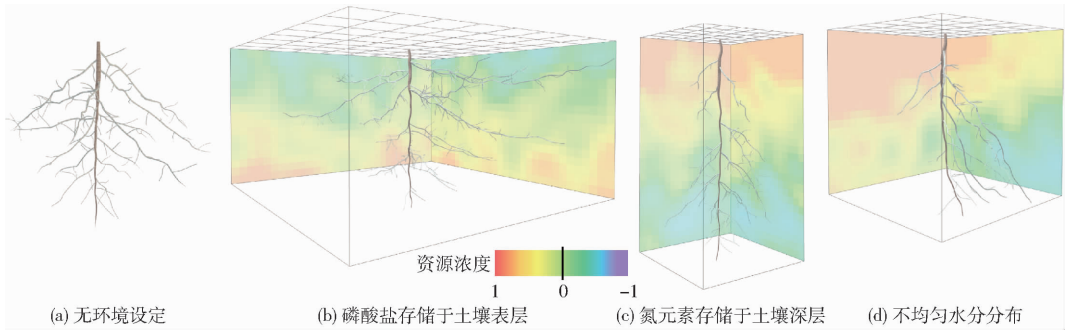


图 10 根系在不同环境下的生长模拟结果

Fig. 10 Simulation results of root growth in different environments

根系与石块的交互和根系在盆中的生长模拟如图 11 所示。由图 11a、11b 可知,根系能够与不同的土壤障碍物贴合生长;由图 11c、11d 可知,根系能够沿着盆壁生长。验证了根系能够在复杂环境中合理

生长。
虽然该可视化算法对根系的形态结构与生长过程具有较好的模拟效果,但自然界中存在一些具有特殊形态的根系,比如板根、寄生根、支柱根等,这些

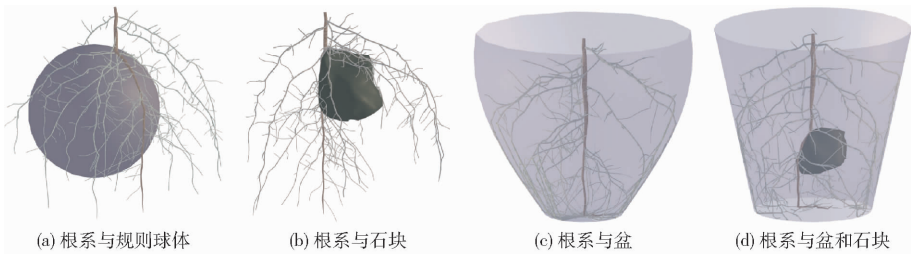


图 11 根系与障碍物的交互结果

Fig. 11 Results of root interaction with obstacles

根系目前还不能够模拟。另外,在环境方面只考虑了对植物影响较大的一些常见非生物因素,如水分、养分、重力与障碍物等,暂未考虑沙漠、盐碱地、极地等不适合植物生长的环境条件。例如适应干旱环境的仙人掌根系,即使处于缺水环境,根系仍能够在浅层土壤中大范围生长。

5 结束语

提出了一种根系与环境交互的动态生长可视化

算法,该算法目的是构建仿真的三维根系模型。首先基于规则构建根系的拓扑结构与空间关键点的信息,随后结合环境参数,根据根系自身特性计算这些内外因素在根系生长过程中产生的影响,最后生成具有动态生长效果的三维根系模型。此外,为用户提供了多种控制根系形态的手段,根系形态包括根茎细节形状与根系整体形态。分析结果表明,该算法可以为多类植物根系进行生长模拟,针对环境中资源分布、向性、障碍物等对根系的影响有较好的模拟效果。

参 考 文 献

[1] LYNCH J P. Roots of the second green revolution[J]. Australian Journal of Botany, 2007, 55(5): 493 – 512.
[2] COMAS L, BECKER S, CRUZ V M V, et al. Root traits contributing to plant productivity under drought[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 442.
[3] DIGGLE A J. ROOTMAP—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems[J]. Plant and Soil, 1988, 105(2): 169 – 178.
[4] LYNCH J P, NIELSEN K L, DAVIS R D, et al. SimRoot: modelling and visualization of root systems[J]. Plant and Soil, 1997, 188(1): 139 – 151.
[5] PAGÈS L, VERCAMBRE G, DROUET J L, et al. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture [J]. Plant and Soil, 2004, 258(1): 103 – 119.
[6] LEITNER D, KLEPSCH S, BODNER G, et al. A dynamic root system growth model based on L-systems[J]. Plant and Soil, 2010, 332(1): 177 – 192.

[23] RYDING J, WILLIAMS E, SMITH M, et al. Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 1095 – 1111.

[24] HOLMGREN J, TULLDAHL H M, NORDLÖF J, et al. Estimation of tree position and stem diameter using simultaneous localization and mapping with data from a backpack-mounted laser scanner[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017, 42:59 – 63.

[25] 齐咏生,陈培亮,刘利强,等. 基于单目视觉的动态环境同步定位与多地图构建算法[J]. 农业机械学报,2022,53(4): 280 – 292.

QI Yongsheng, CHEN Peiliang, LIU Liqiang, et al. Simultaneous localization and multi-mapping algorithm in dynamic environment based on monocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 280 – 292. (in Chinese)

[26] 范永祥,冯仲科,陈盼盼,等. 基于 RGB – D SLAM 手机的森林样地调查系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(8):226 – 234.

FAN Yongxiang, FENG Zhongke, CHEN Panpan, et al. Research on forest plot survey system based on RGB – D SLAM mobile phone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 226 – 234. (in Chinese)

[27] ZHANG J, SINGH S. LOAM: LiDAR odometry and mapping in real-time[C]//Robotics: Science and Systems,2014: 1 – 9.

[28] SHAN T, ENGLÖT B. Lego-loam: lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 4758 – 4765.

[29] KIM G, CHOI S, KIM A. Scan context + + : structural place recognition robust to rotation and lateral variations in urban environments[C]//IEEE Transactions on Robotics, 2021.

[30] SHAN T, ENGLÖT B, MEYERS D, et al. Lio-sam: tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[C]// 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020: 5135 – 5142.

(上接第 281 页)

[7] PAGÈS L, MOREAU D, SARLIKIOTI V, et al. ArchiSimple: a parsimonious model of the root system architecture[C]//IEEE 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, 2012: 297 – 303.

[8] SCHNEPF A, LEITNER D, LANDL M, et al. CRootBox: a structural-functional modelling framework for root systems[J]. Annals of Botany, 2018, 121(5): 1033 – 1053.

[9] 杨乐,彭军,杨红云,等. 基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):208 – 214.

YANG Le, PENG Jun, YANG Hongyun, et al. Three dimensional growth modeling of rice root based on differential L-system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):208 – 214. (in Chinese)

[10] YANG L, WU P, LIAO M, et al. Three-dimensional modeling and visualization of rice root system based on the improved dual-scale automaton and L-system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195:106823.

[11] GRUBER B D, GIEHL R F H, FRIEDEL S, et al. Plasticity of the arabidopsis root system under nutrient deficiencies[J]. Plant Physiology, 2013, 163(1): 161 – 179.

[12] KOEVOETS I T, VENEMA J H, ELZENGA J T, et al. Roots withstanding their environment: exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1335.

[13] JIN W, AUFRECHT J, PATINO-RAMIREZ F, et al. Modeling root system growth around obstacles[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1 – 16.

[14] TURNBULL C. Plant architecture and its manipulation[M]. Taylor and Francis,2012: 182 – 208.

[15] MCQUILLAN I, BERNARD J, PRUSINKIEWICZ P. Algorithms for inferring context-sensitive L-systems[C]// International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation. Springer, Cham, 2018: 117 – 130.

[16] BOUDON F, PRADAL C, COKELAER T, et al. L-Py: an L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language[J]. Frontiers in Plant Science, 2012, 3:76.

[17] VAN MOSSEL D P, MADAN A, LUI T M, et al. Controlling procedural modelling interactively with guiding curves[C]// Graphics Interface, 2019: 12:1 – 12:8.

[18] YANG L, PENG J, SHAO P. Modeling and visualization of rice roots based on morphological parameters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 23407 – 23416.

[19] IJIRI T, OWADA S, IGARASHI T. The sketch L-system: global control of tree modeling using free-form strokes[C]// International Symposium on Smart Graphics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006: 138 – 146.

[20] LONGAY S, RUNIONS A, BOUDON F, et al. TreeSketch: interactive procedural modeling of trees on a tablet[C]//SBIM@ Expressive, 2012: 107 – 120.

[21] PALUBICKI W, HOREL K, LONGAY S, et al. Self-organizing tree models for image synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 1 – 10.

[22] PRUSINKIEWICZ P, LINDENMAYER A. The algorithmic beauty of plants[M]. Springer Science & Business Media, 2012.

[23] 夏桂敏,王宇佳,王淑君,等. 灌溉方式与生物炭对花生根系、磷素利用及产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(2): 316 – 326.

XIA Guimin, WANG Yujia, WANG Shujun, et al. Effects of irrigation methods and biochar on peanut root, phosphorus utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(2): 316 – 326. (in Chinese)