

基于 DLA 的虚拟植物根系模拟方法研究

赵春艳^{1,2}, 马学强^{1,2}

(1. 山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014;

2. 山东省分布式计算机软件新技术重点实验室, 山东 济南 250014)

摘要:传统的根系研究模型注重于根系外观形态的模拟,而将根系的生理生态结合起来的模拟方法则较少。对于农业信息技术而言,根系生理生态的研究模型能更好地服务于农林业领域。文中在研究了 DLA 模型的特点及其应用的基础上,分析了基本 DLA 模型的不足并提出了一种改进的 DLA 模型,用于植物须根系的向水性模拟。该模型结合参数可控方法体现了植物须根系向水性的动态生长过程,一定程度上符合实际植物的生长机理,并在 VC++6.0 上给出了模拟效果图。模拟结果显示,改进的模型能够逼真、细腻地模拟须根系的向水性生长形态。最后指出了改进 DLA 算法关于根系建模进一步的研究方向。

关键词:DLA;分形;虚拟植物;根系模拟

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)02-0119-04

Research on Technology of Simulating Virtual Plant Roots Based on DLA

ZHAO Chun-yan^{1,2}, MA Xue-qiang^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University,

Jinan 250014, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory for Distributed Computer Software Novel Technology,

Jinan 250014, China)

Abstract:Most traditional research models of roots simulate shape of appearance, simulating methods combining physiological ecology of roots are less. Research model of physiological ecology of roots can make better performance in agriculture and forestry field for agricultural information technology. It analyses shortage of basic DLA model based on studying character of DLA model and application, proposes an improved DLA model, which is applied in simulating hydrotropism of roots. The model combining the method of controllable parameters shows that it is better in simulating the hydrotropism growth process for virtual plant roots, which agrees to growth mechanism of real plants. Simulation design sketch is realized using VC++ 6.0. The simulation results show that the improved model realistically and delicately simulates the beard roots hydrotropism growth morphology. The end of the paper points out the future research direction for the improved DLA on roots system simulation.

Key words:DLA; fractal; virtual plant; root simulation

0 引言

20 世纪 80 年代以来,虚拟植物的研究进展迅速,植物模拟已经成为计算机图形学和农业信息技术的重要研究领域。按植物生长部位不同,虚拟植物的研究分为地上部分和地下部分的研究。根系作为植物不可分割的一个有机组成部分,是长期适应土壤条件发育

起来的器官,是水分和养分吸收的主要渠道。常见根系形态有直根系和须根系两类,双子叶植物的根一般为直根系,由较明显的主根和多级侧根组成;单子叶植物的根一般为须根系,没有明显的主根,由若干条须根组成。根系的研究无论从理论上还是从应用价值上都有着非常重要的意义^[1]。

自 Diggle^[2]建立了第一个根系的三维模型后,根系生长模型的常用研究方法还包括 L 系统、分形方法、参考轴技术、植物三维重建法^[3-7]等。L 系统是一种字符串重写系统,它对植物形态进行了形式化的描述,由最初只侧重植物器官的拓扑结构逐渐完善,现已成为模拟植物分叉的主要虚拟植物建模工具之一;参

收稿日期:2011-06-28;修回日期:2011-09-30

基金项目:山东省教育科技计划项目(J09LG52)

作者简介:赵春艳(1984-),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为虚拟植物模拟;马学强,副教授,硕士生导师,研究方向为虚拟植物模型、进化计算等。

考轴技术用有限自动机在描述植物形态上得到植物的生长模型,双尺度自动机即是基于参考轴技术的一种虚拟植物生长建模方法;植物三维重建法主要是应用经验规律和几何方法建立植物的三维结构,完成对其几何形态的模拟,它忽略植物器官或者组织的内部细节,侧重整体形态的构建和模拟。在根系建模领域,鉴于根系生长环境的复杂性、不可见性以及影响植物生长的多因素性,将形态发生模型与生长模型有机结合起来模拟根系的生长形态,一直是国内外研究的前沿课题。钟南等利用 L 系统并引入随机函数构建了通用性较强的根系三维立体模型^[8];彭云峰、张吴平等研究了玉米根系在土壤中的空间分布与氮吸收效率的关系,并以根系长度为参数,利用根系功能-结构模型实现了不同生长发育阶段的玉米根系构型差异的可视化^[9]。袁可、于显平等基于动态生长模型的植物根系模拟技术展开研究,利用改进型 L 系统结合动态数据很好地完成了对根系生长参数的计算,实现了根系生长发育模型和形态发生模型的有机结合^[10]。文中采用改进的 DLA 模型结合植物根的向水性原理,模拟了植物须根系复杂的分形生长形态,具有一定的创新性和应用价值。

1 基本的 DLA 模型

DLA (Diffusion Limited Aggregation) 模型^[11]即有限扩散凝聚模型,由美国密歇根大学的 Witten 和 Sander 在 1981 年首次提出,是分形生长中最为人们所重视的模型之一。DLA 模型是一种随机动态生长模型,它注重表达植物个体或群落生长的动态演化过程,具有动力学生长特性的典型,在单株植物和群落植物的模拟方面都有很好的应用。在模拟如蕨类植物、草本植物的形态以及植物群落的构成等方面具有一定的优势。这也是研究者能够对 DLA 模型做进一步深入研究的主要原因。

基本 DLA 模型的生长过程如下:在一个二维网格平面的中央设置一个粒子做种子点,在距离种子较远的网格随机选取一个点作为移动粒子,该粒子做随机运动,在运动过程中粒子的最终结果分两大类:一是遇到种子点,被不可逆转的黏附,形成凝聚体;二是超过设定的允许运动的边界,停止运动并被舍弃,然后重新释放一个粒子做随机运动。上述过程不断重复,最终形成一个辐射状的分枝结构。

基本 DLA 模型起初在模拟晶体的结晶、烟尘、云雾等领域有很好的应用,随着植物模拟技术的不断发展,DLA 模型的优势很快在虚拟植物领域得到很好的体现。在植物模拟领域,DLA 模型模拟了形态各异的植物结构的生长形态。

DLA 模型在计算机上进行模拟时,一个像素点即为一个网格,移动粒子沿网格线无规则行走,直到运动到种子点相邻的像素点。模型的动力学方程如公式(1)~(3)。

$$\nabla^2 \Phi(\vec{r}, t) = 0 \quad (1)$$

式(1)中, Φ 为 DLA 模型中粒子数密度, t 是时间, \vec{r} 是位置矢量,设时刻 t 、位置 \vec{r} 处的粒子生长速度为 V_n ,则有:

$$V_n = -p\vec{n} \cdot \nabla \Phi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

式(2)中, p 为常数, \vec{n} 是垂直界面的单位矢量。当粒子在无穷远处时,满足以下边界条件。

$$U_\infty = q \quad (3)$$

式(3)中 q 是常数,表示模型中预设的边界条件。边界条件确定了运动粒子扩散控制生长过程中的界面。

在 DLA 模型的动力学基础上,结合表 1 中影响生成图形形态主要参数的取值范围给出了基本 DLA 模型的模拟图形。

表 1 DLA 模型中的主要参数

参数	取值情况
种子点个数 N	$N \geq 1$
粒子释放区域 R	R 为所需的合适范围
移动粒子数 n	$n \geq 1$
粘附几率 p_0	$p_0 \leq 1$
粒子移动方向数 m	$m \leq 8$
移动方向概率 P_i	$P_i \leq 1$, 可取不等的值
凝聚范围 r	一般取半径为 r 的圆

当表 1 中任意一个参数取不同的值时都能生成形态不一的图形。DLA 模型中的粒子释放区域 R 最常用的区域有以下三种:释放区域 R 为一点,即从某一规定的点随机均匀地往外释放粒子;释放区域 R 为一直线,即从某一直线上随机均匀地释放粒子;释放区域 R 为一环带区域,即从某一环带内不断随机均匀地往外释放粒子。

图 1 和图 2 是在其他参数相同的情况下种子点个数 N 取不同值时生成的图形。图 1 为粒子在四个运动方向上的移动概率值相等,且种子点为 1 时的基本 DLA 模型生长图案;图 2 为 $N > 1$ 时,即种子点为一条直线的情况下生成的 DLA 模型生长图案。

2 改进的 DLA 模型模拟小麦须根系向水性

根的向水性指的是植物根对水的刺激的生长反应,即根系往潮湿区域生长的习性^[12]。根在植物的整个生长过程中起着至关重要的作用,根是植株从土壤

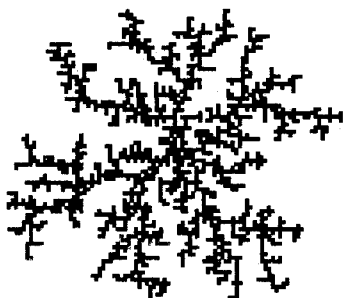


图 1 基本 DLA 模型

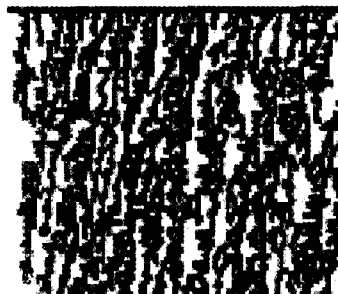


图 2 群落植物根的生长图案

中获得水分、养分的主要器官,其生长状况直接制约着植物的地上生长状况。一直以来虚拟植物的研究一直侧重根的地上部分,对于被土壤覆盖的根的研究较少,随着农业科学和计算机科学的相互渗透,植物根系的计算机建模逐渐重视起来,能为农业提供有力支撑的根系的形态模型和生理模型的结合建模成为研究的重点。

植物的须根系在其整体和部分之间具有结构和性质上的典型自相似性,即一条须根生长到一定阶段再产生二级须根,部分须根结构上的分布形态具有与主体相似的分布形态。而基本 DLA 模型的随机生长方式,也很好地反映了根生长过程中的随机性和多因素生长方式。DLA 模型中粒子的随机性产生及移动模拟了植物根的二级、三级须根生长形态分布的随机性,即:下一个时刻根的何部位开始细胞的分化、组织的生长是随机的。模型中后来释放的粒子很难进入到图形内部,只能粘附在凝聚体的外围分枝上,这种屏蔽效应同时在一定程度上模拟了根尖的顶端生长优势。基本 DLA 模型在模拟植物须根系无向水性时具有很好的可行性,但是在向水性的模拟上存在明显的不足。

2.1 基本 DLA 模型的不足

在传统 DLA 模型的应用研究中,粒子移动方向仅限于上、下、左、右四个方向,并且四个方向上的概率值相同,即 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$ 。虽然最终生成根系能体现分形的自相似性,但是粒子在四个方向上的移动概率过于固定,文中将粒子移动的方向概率值设置为不同区域内取不同的值,成功用于模拟植物须根系向水性的生长形态,在计算机农业领域中具有一定的实际意

义。

图 3 是基本 DLA 模型模拟小麦须根系的实例图。此时粒子移动方向只有四个,且各个方向上的移动概率值相等。各参数值为 $N = 1, r = 3, n = 20000, p_0 = 1, m = 4$, 且 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0.25$ 。基本 DLA 模型模拟小麦根系的过程中,粒子最终较均匀地粘附在凝聚体上,图形具有自相似性但未能结合根系的生理模型体现根的向水性生长形态,以下将对其进行改进,模拟根在土壤水密度分布不均匀情况下的根系动态生长形态。



图 3 DLA 模拟的自然生长的须根系

2.2 DLA 模型的改进

文中针对 DLA 模型存在的不足,对基本 DLA 模型进行改进,如下:

把根与地面接触的点作为根在地下生长的初始点,即 DLA 模型中的种子点,随机产生粒子的区域为左、下、右三个屏幕边界区域,在根的生长区域内设置若干条平行于屏幕对角线且等距离的直线,移动粒子在运动过程中所到区域分为两类,一类为粒子移动到直线上,另一类区域为直线外的所有屏幕区域。粒子移动方向设置为六个,即上、下、左、右,左下、右上六个方向,六个方向上的移动概率值不等,具体取值如表 2 所示。其他主要参数具体取值为: $N = 1, r = 3, n = 20000, p_0 = 1, m = 6$ 。

表 2 改进 DLA 模型中的粒子在各个移动方向上的概率值

方向概率 移动区域	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
直线	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
其他区域	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0

2.3 算法与步骤

改进的 DLA 模型模拟植物须根系的步骤如下:

step1 设显示窗口分辨率为 $a \times b$, 设 $(a/2, b/2)$ 为种子点,即根系的地下部分生长点。

step2 在绘图区域内设置右上倾斜 45 度角的虚拟对角线一条,及两侧各两条与对角线平行且等距离的直线。设置凝聚范围的半径为 r , 粒子粘附几率为 1。

step3 从左下右三个方向的绘图边界上一次一个地释放运动粒子,粒子做随机运动且不断判断周围有无粒子及其所处的区域是否是直线区域,当粒子移动在不同区域上时,各个方向上的移动概率值见表 2。

step4 当粒子遇到种子点则粘附形成凝聚体,且一旦粘附便不可分离;若粒子超过设定的运动区域则被舍弃,并返回到 step3。

算法流程图如图 4 所示。

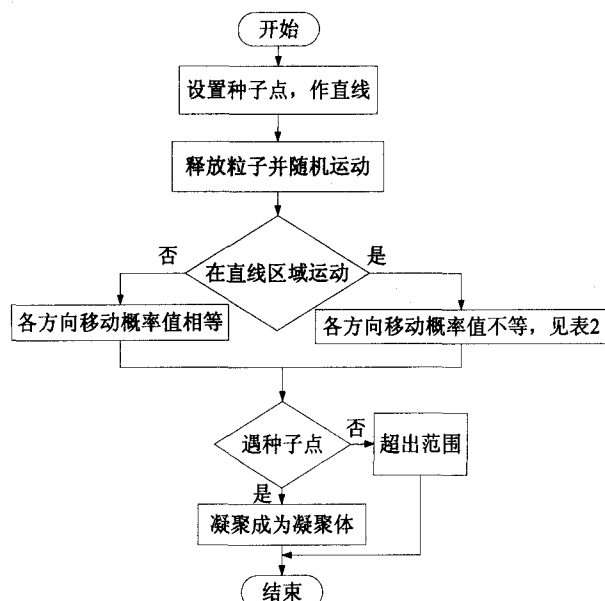


图 4 算法流程图

2.4 小麦根系向水性生长的仿真实例

在 Visual C++6.0 环境下,利用提出的改进 DLA 模型,对植物根系在向水性环境下的动态生长过程进行模拟,模拟结果如图 5 所示。

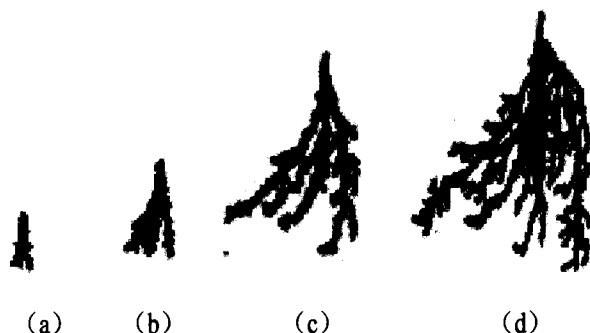


图 5 DLA 模拟的向水性生长的须根系

其中(a)~(d)分别为 $t_1 \sim t_4$ 四个不同生长时刻的根系向水性生长形态模拟图。

当粒子移动到直线区域时 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0.1$, $P_5 = P_6 = 0.3$, 粒子在六个方向上的移动概率值不等;而当粒子移动到直线以外的区域时,粒子在四个方向上的移动概率值相等。

3 结束语

文中通过改进 DLA 模型模拟植物根系的向水性,拓展了植物生长建模在根系模拟领域的思路,丰富了 DLA 模型及植物仿真技术,在数字农业、虚拟现实技术、计算机动画等方面都有很好的应用。算法本身思想简单,能体现植物须根系的动态生长过程,很好地模拟了植物须根系的向水性生长趋势,为植物根系生长机模型的研究做了一定的铺垫。但由于植物在生长过程中的影响因素众多,很难真实地反应根系的实际生长情况,且算法在根系模拟中的凝聚范围的半径需设置较小,导致最终根系形态和真实形态间存在一定差距。

今后可以结合影响根系生长过程中的其他因素,如基因、重力、土壤肥沃程度等做进一步的研究,以便更好与植物生理生态相结合。

参考文献:

- [1] Lynch J P. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109: 7-13.
- [2] 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: 169-178.
- [3] 王功明,郭新宇,赵春江,等. 虚拟植物根系生长模型分析和比较[J]. 作物研究, 2006(3): 218-285.
- [4] Pages L, Jordan M O, Picard D. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system[J]. Plant and Soil, 1989, 119: 147-154.
- [5] 邓旭阳,周淑秋,郭新宇,等. 玉米根系几何造型研究[J]. 工程图学学报, 2004(4): 62-66.
- [6] 冯 斌,杨培岭. 植物根系的分形及计算机模拟[J]. 中国农业大学学报, 2000(5): 96-99.
- [7] 张吴平,李保国. 棉花根系生长发育的虚拟研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 283-286.
- [8] 钟 南,罗锡文,严小龙,等. 植物根系生长的三维可视化模拟[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5): 516-518.
- [9] 彭云峰,张吴平,李春俭. 不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较: 模拟与应用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 843-853.
- [10] 袁 可,于显平,吕 伟,等. 基于动态生长模型的植物根系模拟研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 868-872.
- [11] Witten S. Effective Harmonic Fluid Approach to Low Energy Properties of One Dimensional Quantum Fluids[J]. Phys Rev-Let, 1981, 47: 1400-1408.
- [12] 金明现,王天铎. 玉米根系生长及向水性的模拟[J]. 植物学报, 1996, 38(5): 384-390.