

植物茎生长过程细粒度仿真*

朱庆生¹ 黄伟¹ 屈洪春¹ 黄启中² 郑敏¹

(1. 重庆大学计算机学院, 重庆 400030; 2. 重庆农业科学研究院, 重庆 400055)

【摘要】 为真实仿真植物茎生长过程,对植物茎以及分枝进行更细粒度划分,把茎的生长按分生区、伸长区、成熟区三级结构划分依次迭代,结合参数 L 系统仿真植物的形态几何结构,达到了良好的效果。对植物分生区设置 flower、subaxis、leaf 3 种侧芽因子,以提高植物生成不同器官的可控性。通过仿真实验表明细粒度划分能够降低参数 L 系统的复杂度,较真实地仿真植物的生长过程及植物学现象。

关键词: 植物生长模拟 茎 细粒度划分 参数 L 系统 侧芽因子 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0192-05

Fine-grained Simulation of the Plant Stem Growth Process

Zhu Qingsheng¹ Huang Wei¹ Qu Hongchun¹ Huang Qizhong² Zheng Min¹

(1. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2. Chongqing Agricultural Science Institute, Chongqing 400055, China)

Abstract

In order to simulate the growth of plant stem, plant stem and branches were divided into fine grit, and the plant growth process was iterated by dividing the stem into tertiary structure of meristematic zone, elongation zone, maturation zone. The parametric L-systems theories were applied in simulating the geometry shape of the plant. This method can achieve a better result. For plant meristematic zone, three kinds of lateral bud factor of flower, subaxis, leaf were set to improve the controllability of different organs in plant growth. At last, the simulation experimental results showed that this method could reduce the complexity of parametric L-systems, and make the real simulation of plant's growth process and the phenomena of botany.

Key words Plant growth simulation, Stem, Process fine-grained division, Parametric L-systems, Lateral bud factor, Simulation

引言

虚拟植物是以一定的植物结构模型与生理模型为基础,精确模拟植物的空间几何拓扑结构,使虚拟植物能准确、可靠地反映植物的生长发育规律。

国内外基于虚拟植物的生长结构模型已有较为深入的研究^[1-3]。但现有的不同模型,在模拟植物茎的生长方面,都以节间或者叶元为最细粒度划分,没有对轴(本文把茎与侧枝统称为轴)及其生长过程进行更细粒度的分析。在植物学上,植物的轴生长并不是简单的节间迭代过程,轴的不同段部分也

有不同的属性。传统的以节间为最小粒度并不能体现植物轴生长的此类规则。这种划分忽略了植物轴的细粒度生长过程。

本文提出对植物轴进行再细粒度的结构划分,将植物轴划分为分生区、伸长区、成熟区三级结构,依次迭代仿真植物的生长过程。选择基于参数 L 系统理论模型,在三级结构上,首先通过对分生区设置 3 种侧芽因子提高植物叶、花、分枝的发生及发生时间的可控性;再对伸长区与成熟区设置其伸长生长与次生生长的速率,调控整株植物的伸长及增粗,以真实的仿真植物茎的细粒度生长过程,补充原 L

收稿日期: 2010-05-18 修回日期: 2010-07-30

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z233)和自然科学基金资助项目(60773082)

作者简介: 朱庆生,教授,博士生导师,主要从事图像处理、虚拟现实、商务智能研究,E-mail: qszhu@cqu.edu.cn

系统在仿真真实植物生长过程方面的不足。

1 前期工作

本研究是根据植物轴生长的三级结构细粒度划分,结合 L 系统,以真实仿真植物茎的生长过程。L 系统原理是从公理 (axiom) 出发,通过产生式规则 (production) 进行逐步迭代,生成一个字符发展序列。然后,把字符发展序列表现为图形的形式,并利用自然界植物的规则性和自相似性,通过自相似性和字符串迭代原则生成植物的拓扑结构,最终实现植物的动态生长。

植物主体结构如图 1 所示。植物的主体结构由茎及枝条组成,为了命名方便,采用轴 (plant axis) 的概念来表述植物的茎与各级分枝,不考虑根的划分。

轴上着生叶的部位称为节 (node); 相邻两个节之间的部分称为节间 (internode)。主轴与侧轴的顶端为顶端分生组织, 3. 腋芽 4. 叶柄 5. 节 6. 叶腋处着生有芽,称为腋芽。在植物的逐步生长过程中,有分生区、伸长区、成熟区的划分,分生区顶部为顶端分生组织^[4]。

为拟合植物真实生长过程,在仿真植物分枝规律以及器官的发生方面提取其植物学上的生长规律:

- (1) 叶片、果实等器官与侧轴等是由芽分化发育而来的。根据芽在茎上发生的位置不同,可以分为顶芽和腋芽。一般生在茎的主干或侧枝顶端的芽叫顶芽,而着生在叶腋处的芽叫腋芽,亦称侧芽。
- (2) 高等植物的茎分枝主要有二叉分枝、单轴分枝、合轴分枝、假二叉分枝。在仿真植物生长规则时,必须考虑不同植物的分枝类型。各分枝结构特点参考文献^[5]。
- (3) 植物的各个侧轴的发生与主茎的顶端生长方式相似,是因为节在其逐步生长中突起顶端又形成芽的顶端分生组织,从而和主茎上的茎端一样发展而形成侧枝。

2 实现过程

2.1 植物轴细粒度划分

根据植物学轴生长原理,把植物轴生长过程进行再细粒度的划分,从微观方面真实再现植物轴生

长。完整植株是由植物顶端分生组织发育分化而来的,植物顶端分生组织包括生长锥、叶原基、腋芽原基和花部原基,它们将是地上部分所有新结构、新器官的来源。植物茎生长是节间分生区、伸长区、成熟区 3 个部分依次变化的过程,3 分区的详细描述参照文献^[4,6]。本文通过总结归纳 3 个分区,定义其三级结构及其参数:

(1) 分生区 $MS(t, bud_n)$, 参数 t 控制植物的生长时间,当 t 达一定时间后,其顶部顶端分生组织不断分化形成分生区,其基部分化为 $ES([x, y, z], t)$ 。参数 bud_n 表示分生区基部可能产生的腋芽,包括 3 种侧芽因子:演化成花芽的 flower 侧芽因子,演化成侧轴的 subaxis 侧芽因子,演化成叶片的 leaf 侧芽因子, n 表示侧芽因子数,且 $0 \leq n \leq 3$ 。根据植物生长所处的不同时期控制不同侧芽因子的发生。

(2) 伸长区 $ES([x, y, z], t)$, 主要进行伸长生长,参数 x, y, z 表示植物在空间坐标系内的长度。 x, z 控制植物的直径变化, y 控制植物的伸长长度变化,在伸长区时间段内 x, z 不变。 y 的伸长节奏,可以根据不同植物的特点得出不同的伸长速率。这里暂时用 v_{es} 表示 y 的伸长速率,在伸长区所处的时间段内, $y_{new} = y_{old} + t v_{es}$, v_{es} 可以为一个常量,也可以为一个函数。

(3) 在成熟区 $IS([x, y, z], t)$, 主要进行次生生长, y 值几乎不变, x, z 变大,根据不同植物特点得出不同的直径变化速率,用 v_{is} 表示其直径变化速率,在成熟区所处的时间段内, $\begin{cases} x_{new} = x_{old} + t v_{is} \\ z_{new} = z_{old} + t v_{is} \end{cases}$ 。 v_{is} 以为一个常量,也可以为一个函数。

根据上述轴生长过程的迭代规则,在仿真植物主体生长方面,可以简化参数 L 系统在仿真复杂植物生长方面所需要的参数数量。

表 1 表示三级结构的属性表,三级结构的跳转关系如图 2 所示。通过植物节间的三级划分,在伸长区和成熟区设置植物的长度以及直径变化,简化了分生区参数的设置。

表 1 三级结构属性
Tab.1 Attribute list of triple-structure

节间	节间图示	转换类型	节间属性	跳转结果
分生区 MS	▲	■	3 种侧芽因子	MS、ES
伸长区 ES	▨	▨	y 值变化	IS
成熟区 IS	▩	▩	x, z 值变化	IS

在分生区,根据不同植物的特点,设置 3 种侧芽因子出现的时间及其概率,分生区表示为

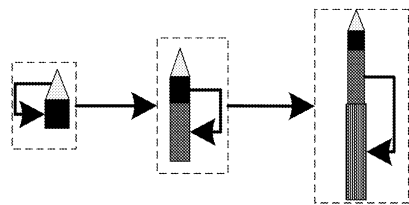


图 2 三级结构的跳转示意图

Fig.2 Transfer diagram of triple-structure

$$MS\left(t, bud\begin{cases} subaxis(f(x)) \\ leaf(1,0) \\ flower(g(t)) \end{cases}\right)$$

$f(x)$ 表示其分枝出现概率, $f(x)=1$ 表示出现分枝,

$f(x)=0$ 表示分枝被抑制, $g(t)$ 表示花芽出现概率,同 $f(x)$ 。本文并不讨论受外界环境影响下分枝以及花芽出现的概率,因此对3种侧芽因子的出现概率均采用二值函数处理,表2列出分生区产生的侧芽出现的组合概率,共有 $2^3=8$ 种不同的组合。

自然界植物的分枝、开花等并不是概率事件,如分枝的产生不仅要考虑其激素所调控的顶端优势,还要考虑外界因素,如裁剪枝条等^[5]。因此可以通过本文所提出的方法设置一个主轴与侧轴负相关关系的生长函数来控制侧枝的发生时间,模拟植物的顶端优势。

表 2 侧芽因子随机组合

Tab.2 Random combination of lateral bud factor

侧芽因子		随机组合						
侧枝	0	1	0	0	1	1	0	1
叶	0	0	0	1	0	1	1	1
花	0	0	1	0	1	0	1	1
结果	侧芽	侧枝	花	叶	侧枝+花	侧枝+花	花+叶	侧枝+花+叶

2.2 植物生长过程的 L 文法实现

传统 L 系统仿真植物生长,产生如图 3 所示图形效果,产生式如下:

公理(axiom)为: $\omega \rightarrow F$,产生式规则 P 为 $F(t) \rightarrow F(t)[RU(30)F(t)][RU(-30)F(t)]F(t)$

基于本文对轴的三级结构划分规则,仿真植物生长文法为

$\{root(t), *, *, [] : < > MS(t, bud_n) root(t + 1)\}$
 $\{MS(t), *, *, [] : < > ES([x, y + tw_{es}, z], t + 1)\}$
 $\{ES(t), *, *, [] : < > IS([x + tw_{is}, y, z + tw_{is}], t + 1)[RU(30)MS(t, bud_n)][RU(-30)MS(t, bud_n)]\}$

在分生区(MS)的顶端设置生长点,表示顶端分生组织。不断产生分生区(MS),MS到一定生理年龄,被伸长区(ES)替换,ES到一定生理年龄,被成熟区(IS)替换,迭代效果如图4所示。

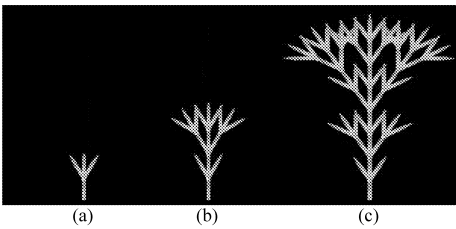


图 3 划分三级结构前 L 系统迭代效果

Fig.3 Iterative results before dividing triple-structure

(a) $t=1$ (b) $t=2$ (c) $t=3$

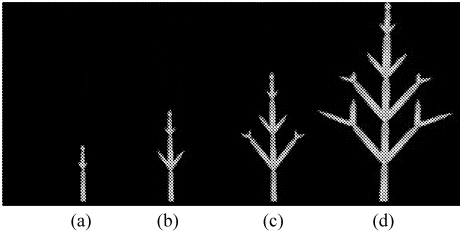


图 4 划分三级结构后 L 系统迭代效果

Fig.4 Iterative results after dividing triple-structure

(a) $t=3$ (b) $t=4$ (c) $t=5$ (d) $t=6$

植株的生长过程中,体现了植株不同阶段节间从分生区到成熟区的变化过程,而图3在模拟真实植物的生长过程中,则体现不出这一变化过程。

根据植物的轴三级结构迭代规则仿真植物的主轴及侧轴、花的发生(暂时不考虑叶片的发生,以便清楚了解分枝与花的产生)在理想情况下,本文仿真实现假二叉分枝的发生:

/* * 从中截取部分 L 文法,从假二叉分枝处开始;

$\{root(t), *, *, [] : < > MS(N_1, bud(subaxis(1), leaf(0), flower(1)))\}$

/* * subaxis()中 $f(x)=1$,枝芽萌发,产生分枝; flower()中 $g(x)=1$,花芽萌发,开花;

$\{MS(t), *, *, [t=N_1] : < > branch(N_2)\}$

/* * 分枝处产生花芽;
/* * $\{branch(t), *, *, [t=N_2] : < 1.0 > [RR(105)flower(1)][RU(a)right(N_3)][RU(-a)left(N_3)]\}$

经过图3与图4的对比可以看出,图4在模拟

/* * 分枝处由于环境等因素未产生花芽，这里暂时不考虑这条因素；

/* * {branch(t), *, *, [t = N₂]: < 1.0 > [RU(a)right(N₃)] [RU(-a)left(N₃)]}

/* * 右分枝；
{right(t), *, *, [t = N₃]: < > RMS(t)root(t + 1)}

{RMS(t), *, *, [] : < > RES([x, y + tw_{res}, z], t + 1)}

{RES(t), *, *, [O₁ < t < O₂]: < > RIS([x + tw_{ris}, y, z + tw_{ris}], t + 1)}

/* * 左分枝；
{left(t), *, *, [t = N₃]: < > LMS(t)root(t + 1)}

{LMS(t), *, *, [] : < > LES([x, y + tw_{les}, z], t + 1)}

{LES(t), *, *, [O₃ < t < O₄]: < > LIS([x + tw_{lis}, y, z + tw_{lis}], t + 1)}

/* * 迭代产生相似分枝结构；
{RMS(t), *, *, [t = O₂]: < 1.0 > RH(90)branch(1)}

{LMS(t), *, *, [t = O₄]: < 1.0 > RH(90)branch(1)}

迭代后产生如图 5 所示的假二叉分枝。

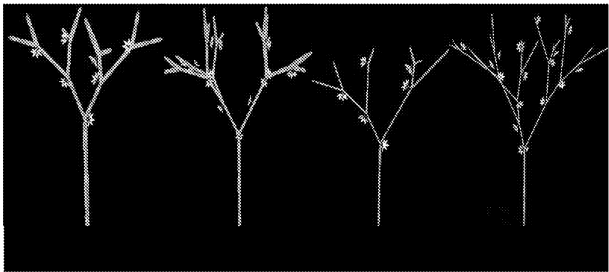


图 5 假二叉分枝模型

Fig. 5 Model of false dichotomous branching

3 仿真实验

本文基于 L 系统理论模型,结合 Java 平台,运用 Java3D 技术开发仿真植物平台系统 PlantLab,以实现植株的生长建模。

(1) 通过真实记录实验观察,植株在生长后期,特别是进入生殖生长时期,植物主轴原先拥有的顶端优势将逐渐变弱,侧芽逐渐打破休眠,重新发育成新枝。通过设置分生区的分枝参数因子 subaxis 可以调整不同植株部位发育新枝的时间,如图 6 所示,给出了仿真辣椒植株的生长过程以及与真实植株的对比效果。从图 6a 可以看出,植物的轴在生长早期并未产生新的分枝,但是在一定条件和时期后,特别

是生长后期,原有休眠的侧芽打破休眠,恢复了萌芽状态;并且新枝发育的数量随着植物生长时间的推移而逐渐变多,特别是假二叉分枝上的新枝也逐渐增多。图 7 则具体展现了仿真植株后期发育的新枝与真实植株的比较,图中已用数字做了标记。本实验的目的主要是为了表现利用三级结构的划分在模拟植株的真实度上的提高,以及 3 种侧芽因子的设定在提高侧枝发生的可控性方面所展现出来的优点。

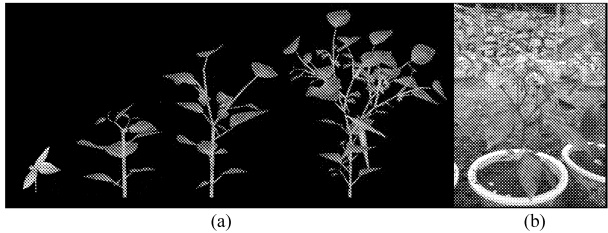


图 6 辣椒植株的生长过程

Fig. 6 Growth of pepper

(a) 模拟植株 (b) 真实植株

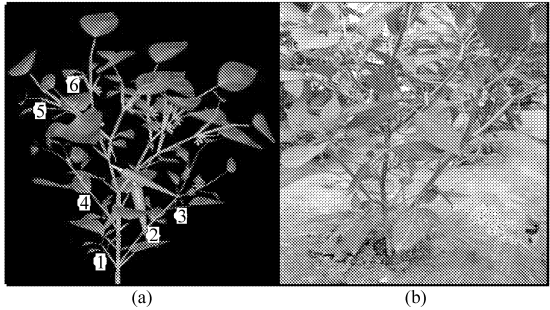


图 7 后期分枝效果图

Fig. 7 Branch figure of later stage

(a) 模拟植株 (b) 真实植株

(2) 在自然环境中,植物的生长并不是像图 6 中直立有规律地生长,通常由于向光性和向重力性等原因有弯曲的效果。根据植物生长过程三级结构的划分,在分生区加入角度随机变化函数 $\lambda(t)$ 来驱动分生区生长时的角度变化,从而驱动整株植物生长的最终角度变化,使得植物产生弯曲效果。图 8 给出了加入角度变化函数后与未加角度变化函数前的比较。植物的顶端优势与植物株型布局、分枝情

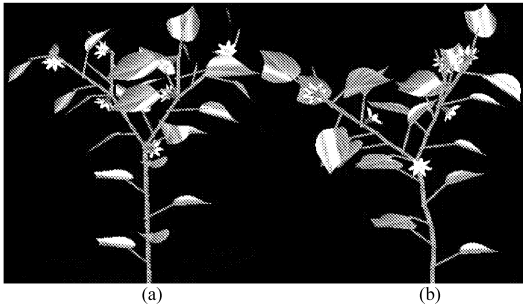


图 8 弯曲效果图

Fig. 8 Figure of bended plant

(a) 直立生长 (b) 弯曲生长

况密切相关,植物激素处于诸多调控信号所构成的网络系统的中心,它们在植物株型形成过程中发挥着重要作用。结合本实验方法可以仿真向光性、向重力性等引起植物的弯曲效果,最终帮助实现植物株型的空间整体布局以及局部竞争效果。

4 结束语

本文基于参数 L 系统,对植物轴进行再细粒度的划分,以及提出侧芽因子等概念,简化了参数 L

系统在模拟植物生长过程中描述植物轴属性所需的参数数量;通过设置侧芽因子数,以及其产生的概率性,可以某种程度上实现随机 L 系统的功能;随机的参数仅局限于侧芽因子中,并且都以侧芽 bud 的形式存在,简化了器官生长与植物主体结合的位置参数,使得 L 文法更容易从植物学的角度理解。通过对植物结构模型的更细粒度仿真,对植物的功能模型(如植物的顶端优势、向重力性生长等)研究也有很好的帮助。

参 考 文 献

1 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer-Verlag, 1996.

2 赵星,de Reffye Philippe,熊范纶,等. 虚拟植物生长的双尺度自动机模型[J]. 计算机学报,2001,24(6):608~615.
Zhao Xing, de Reffye Philippe, Xiong Fanguan, et al. Dual-scale automaton model for virtual plant development[J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(6): 608~615. (in Chinese)

3 Qu Hongchun, Zhu Qingsheng, Zeng Lingqiu, et al. Automata-based L-grammar extraction from multiple images for virtual plants[C]//3rd International Conference on Bio-inspired Computing: Theories and Applications (BIC TA2008), 2008: 89~96.

4 Hawkes J G, Lester R N. A review of branching patterns in the solanaceae[M]//Hawkes J G, Lester R N, Skelding A D. The biology and taxonomy of the solanaceae. London: Academic Press, 1979: 345~356.

5 王忠,李合生,王三根,等. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:264~301,331~365.

6 胡宝忠,胡国宣. 植物学[M]. 北京:中国农业出版社,2002:108~150.

7 Allen M, Prusinkiewicz P, DeJong T. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model [J]. New Philologist, 2005, 166(3): 869~880.

8 Prusinkiewicz P. Modeling plant growth and development [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2004, 7(1): 79~83.

9 唐卫东,李萍萍. 基于状态机的植物生长模型可视化研究[J]. 农业机械学报,2006,37(7):104~108.
Tang Weidong, Li Pingping. Research on visualization of plant development model using state theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 104~108. (in Chinese)

(上接第 207 页)

3 Chiang C H. An algebraic treatment of Burmester points by means of three basic poles[J]. Mechanism and Machine Theory, 1987,22(1):47~53.

4 阿尔托包列夫斯基. 平面机构综合:下册[M]. 孙可宗,译. 北京:高等教育出版社,1965.

5 Han Jianyou, Qian Weixiang. On the solution of region-based planar four-bar motion generation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2):457~465.

6 格罗尼穆斯. 平面机构综合理论的几何工具[M]. 陈兆雄,译. 北京:机械工业出版社,1966.

7 Chiang C H. Synthesis of four-bar function generators by means of equations of three relative poles—1. finitely separated positions[J]. Mechanism and Machine Theory, 1975, 10(1):81~91.

8 Chiang C H. Synthesis of four-bar function generators by means of equations of three relative poles—2. mixed “point-order” synthesis[J]. Mechanism and Machine Theory, 1975, 10(1): 93~109.

9 钱卫香,韩建友. 实现连架杆给定角位移的机构综合方法[J]. 农业机械学报,2009,40(5):222~226.
Qian Weixiang, Han Jianyou. Synthesis method for planar four-bar linkages given angle displacements of rotating links[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):222~226. (in Chinese)

10 熊滨生. 现代连杆机构设计[M]. 北京:化学工业出版社,2006.