

# 虚拟现实实验中虚拟植物的建模

戴小鹏, 黄 璜

(湖南农业大学计算机与信息工程学院, 长沙 410128)

**摘要:** 虚拟植物技术对作物产量预测、土地生产力评价、资源环境分析、作物栽培指导、作物生长机理研究以及调控作物生长发育及其对环境的反应研究都有着十分重要的意义。目前虚拟植物普遍使用的玉米叶脉曲线拟合曲线函数在叶尖坐标  $Y$  不是最大坐标的时候, 不能很好地描述叶曲线。该文以玉米叶子的中脉为轴线, 贴合玉米叶子的平面纹理图像。将玉米叶子中脉表达成 3 次  $B$  样条曲线, 实施空间变形, 再将纹理图像嵌入到变形后玉米叶脉曲线的局部标架中。该方法在叶尖坐标是否最大坐标时都适用, 直接进行曲线拟合, 而不必进行叶片角度旋转, 绘制出的玉米叶子具有叶子的脉络细节, 真实感较强。

**关键词:** 虚拟植物; 分形; 纹理图像;  $B$  样条曲线

## Virtual Plants Modeling in Virtual Reality Lab

DAI Xiao-peng, HUANG Huang

(School of Computer & Information Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

**【Abstract】** Virtual plant technique is significant to crop yield, land productivity evaluation, resources environment analysis, crop cultivation instruction, crop growth mechanism research and control over crop growth and its reaction to the environment. This paper takes the midrib of maize leaf as axis and joins plane texture image of maize leaf, expresses the midrib of maize leaf as  $B$ -splines, carries out space transform, and embeds the texture image into transformed midrib curve of maize leaf. The method can be applied to all coordinates of the apex of leaf, where curve fitting can be carried out directly without leaf angle circumgyration, which yields maize leaves as real as they are.

**【Key words】** virtual plant; fractal; texture image;  $B$ -splines

实验是教学活动中一个必不可少的环节, 能培养学生的实际操作能力和解决问题的能力, 学生的实践能力大部分是通过做实验得到的。然而, 并不是所有的学校都能够提供所有的实验所要求的条件, 由于各种原因很多本应开设的实验而未进行。虚拟技术能使人感觉形象逼真, 用户通过各种途径和手段来与计算机进行自由的交互, 在虚拟环境中获得视觉、听觉、触觉、等多种满足, 从而达到身临其境的感受<sup>[1]</sup>。

虚拟植物就是利用虚拟技术通过计算机模拟植物的生长发育过程。生成的植物不仅可以反映植物的形态结构、具有真实感的三维植物个体或群体, 还能获得植物生理生态过程和形态结构的并行过程的结果<sup>[2-3]</sup>。与传统的植物生长模拟模型相比, 虚拟植物模型具有更突出的优势。应用虚拟植物模型, 可以直观地对农田、森林等复杂的生态系统进行研究, 发现传统研究方法和技术手段难以观察到的规律; 虚拟植物(农作物)生长技术在虚拟农田环境系统中进行虚拟实验, 可部分替代在现实生活中难以进行或费时、费力、昂贵的试验, 缩短某些研究课题的试验周期或节省大量的试验费用, 如虚拟育种、虚拟施肥、虚拟剪枝等。利用虚拟技术建立虚拟农场, 使学生和农民在计算机上学习作物生长过程和农田管理知识, 可取得传统方式无法达到的效果。

### 1 植物模拟方法

为量化研究植物的生长规律, 从 20 世纪 60 年代中期开始, 研究人员就开始了植物生长的模拟研究。所建立的模型通过对植物生理生态过程的模拟, 能够预测不同环境条件下生长的植物的某些综合指标, 如作物的产量、牧草的生物量, 叶面积指数动态, 器官的生物量、数量等, 而在植物形

态结构和环境因素的时空变异对植物生长的影响等方面进行了简化处理<sup>[4-5]</sup>。这类模型与专家系统结合, 对农业教学及生产等领域具有重要的指导意义。目前在植物模拟方法上主要有以下 3 种<sup>[6]</sup>。

#### 1.1 分形方法

分形方法是一种利用植物形态结构的分形性质(结构自相似性)产生植物图形或图像的方法<sup>[7]</sup>, 包括:  $L$ -系统, IFS(迭代函数系统)法, DLA(受限扩散凝聚)模型法等。

$L$ -系统是美国植物学家 Lindenmayer 在 1968 年提出的<sup>[8]</sup>, 它以形式化的语言描述植物的结构和生长, 用语言的终结符与植物结构相对应, 由文法生成的句子代表植物, 而句子生成的中间过程是植物的生长发育过程。其后, Smith 等人将  $L$ -系统引入到植物模拟的分枝拓扑结构研究中, 并称之为文法构图方法。 $L$ -系统能简洁地描述植物地拓扑结构, 例如枝条和花序结构, 但较难模拟复杂的植物形态。如图 1 所示。

迭代函数系统(iterated function system)理论是 Hutchinson 和 Barnsley 先后提出并发展的一种研究分形集的数学方法。IFS 由一组能满足一定条件的映射函数  $W_i$ (例如, 收缩的仿射变换)及一组变换发生的概率  $P_i$  定义:

$$IFS_i = \{(W_i, P_i), i=1, 2, \dots, n\}$$

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2004AA115250); 湖南农业大学人才引进基金资助项目(03YJ08)

**作者简介:** 戴小鹏(1964-), 男, 博士研究生, 主研方向: 农业专家系统和农业灾害治理; 黄璜, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2006-12-29 **E-mail:** dxp\_18@163.com



图1 L-系统产生的植物图像

利用 IFS 生成植物图像的过程是对初始植物图像按照已知概率选择函数而实施的一种迭代变换。

受限扩散凝聚模型(diffusion-limited aggregation, DLA)模型,是美国科学家 Witten 和 Sander 于 1981 年提出的。DLA 模型的基本方法是:在一个平面网格上选定一个静止的微粒作为种子,然后在距种子较远的格点上产生一个微粒,令微粒沿网格上下左右诸方向随机行走。如果该微粒在行走过程中与种子相碰,就凝聚到种子上;如果微粒走到边界上,就被边界吸收而消失。如此重复上述步骤,就会以种子为中心形成一个不断增长的凝聚集团。利用 DLA 和其修改的模型可以对部分植物的形态结构进行计算机模拟,例如植物根系的生长过程模拟和海藻类植物的形态结构模拟等。

### 1.2 粒子系统法

粒子系统方法是由 W.T.Reeves 在 1983 年提出的,最早用于模拟火焰、烟雾等,逐渐被用于生成真实感的自然景物如森林。其基本思想是采用许多形状简单的微小粒子(例如点、小立方体、小球等)作为基本元素来表示自然界不规则的模糊景物,粒子的创建、消失和运动轨迹由所造型的物体的特性控制,从而形成景物的动态变化。由粒子系统表示的物体,要么是给定时刻粒子的位置,如火和焰火,要么是粒子的一部分运动轨迹,如草和树。根据这种思想,可以用圆台状粒子组成植物的枝条,用小球状或小立方体粒子组成叶,只要建立了这些粒子组合或排列的模型,就可以实现植物形态结构的模拟,粒子在生命周期中的变化就会反映出植物生长发育最终枯萎的过程。在粒子系统中引入随机变量以产生必要的变化,同时选取一些决定性的参数来表达植物地大致形态。在树的情况下,会有多到 30 个参数用于控制分枝的角度和枝干的长度。粒子系统的一个主要优点是易于被变换和实现反走样。其主要缺点是景物的表达涉及大量的基本图元,因此,设计是一个反复试验和修改的过程,绘制必须有专用的阴影计算方法。

### 1.3 三维结构模型

三维结构模型是一种基于植物形态结构几何描述的模拟方法。目前该方法包括基于静态结构的几何设计方法和基于动态结构及其调节的生长法两种。

几何设计法以一组几何描述量和描述规则产生植物的几何结构,并以此建立植物的三维结构模型。模型以植物特定的分枝模式为基础,使用分枝角、分枝长度比例、吸引子等几何量,实施对植物几何结构的控制修改。这种方法能迅速直观地建立植物的各种形态结构,但依赖于设计者对植物几何外观的认识,难以生成植物在不同时期的生长序列,反映不了植物的潜在形态。

生长法通过对植物生长发育过程地模拟而得到植物的形

态结构。不同的生长发育控制手段将会产生不同的模拟算法,有的控制手段仅与植物自身的结构相关,有的采用“虚拟的植物激素”作为生长发育的调节手段。生长法对植物形态结构以及生长发育有很强的模拟潜力,适合于以植物学、生理学和生态学为依据的植物模拟研究。

## 2 玉米叶片建模

### 2.1 叶曲线及轮廓描述算法

在叶脉不发生弯曲和扭曲的情况下,叶脉曲线是一条光滑的二维曲线,可以用适当的数学表达式描述,目前普遍使用的玉米叶脉曲线拟合曲线函数如下:

$$Ax^2+By^2+Cxy+Dx+Ey+G=0 \quad (1)$$

坐标原点是叶脉基部,简化公式为

$$Ax^2+By^2+Cxy+Dx+Ey=0 \quad (2)$$

然后将已经测量得到的采样点代入式(2),求解方程组就可以得到方程系数A、B、C、D、E,就可以得到曲线上所有点的坐标。该方法简便直观,但需要计算求解方程组,而且在叶尖坐标Y不是最大坐标的时候,不能很好地描述叶曲线,需要将叶片旋转一定角度,使叶尖的Y坐标为最大坐标。因此,本文采用3次B样条曲线拟合<sup>[9]</sup>,该方法在叶尖坐标是否最大坐标时都适用,直接进行曲线拟合,而不必进行叶片角度旋转。

3次B样条曲线是目前应用最广泛且具有二阶连续导数的3次样条插值函数,定义为:如果函数 $S(x)$ 于 $[a, b]$ 有二阶连续导数,且在每小区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 上是3次多项式,则称 $S(x)$ 是节点 $x_0, x_1, \dots, x_n$ 的3次样条函数。数学描述为:设 $P_0, P_1, P_2, P_3$ 给定空间的点,称下列参数曲线

$$P(t) = \sum_{i=1}^4 P_i B_{i,k}(t), t_k \leq t \leq t_{n+1} \quad (3)$$

为4阶或3次B样条曲线。为了使曲线通过 $P_i$ ,只要使 $P_i, P_{i+1}, P_{i+2}$ 结合则可。式(3)写成通用公式如下所示:

$$P(t) = ((1-3t+3t^2-t^3)P_i + (3t^3-6t^2+4)P_{i+1} + (-3t^3+3t^2+3t+1)P_{i+2} + tP_{i+3})/6 \quad (4)$$

将测量得到的数据点作为控制点代入式(4)可得到叶脉曲线和叶轮廓曲线上的点坐标,从而得到叶脉曲线和叶轮廓曲线,如图2所示。



图2 玉米叶脉与叶轮廓曲线

### 2.2 玉米叶片几何造型

在实际测量中,以玉米叶片的基部(叶脉与叶环交点)为坐标原点,叶脉走向为Y轴正方向,叶脉向Z轴正方向弯曲,叶宽方向为X轴。采集前首先记录下叶片的方位角(正北方向为顺时针为正向)和仰角,然后将玉米叶片旋转到规定的坐标系,采集是以叶片边缘的皱褶为采样点,依次在叶子两边缘和叶脉采集点坐标,在整个叶长方向任意采集8个采样点,以备建模时进行分析研究。

本文以玉米叶子的中脉为轴线,贴合玉米叶子的平面纹理图像,然后将玉米叶子中脉表达成3次B样条曲线,实施空间变形,再将纹理图像嵌入到变形后叶脉曲线的局部标架中。由于玉米叶子的中脉至于纹理平面的中心线上,玉米叶

子中脉上各点的横向坐标纹理坐标  $s$  均为 0.5。此外,由于玉米叶子的纹理图像只占据纹理平面上的一部分,因此需要在纹理平面上设置不透明度,即把玉米叶子图像所占据的纹理像素不透明度设置为 1,纹理平面上其余像素的不透明度设置为 0,利用 OpenGL 的  $\alpha$  校验就可以实现对玉米叶子的绘制,绘制出的玉米叶子具有玉米叶子的脉络细节,形状真实感较强<sup>[10]</sup>。

要将纹理图像附着在曲线上,首先定义 3 个映射函数  $S = S(t)$ ,  $sN = sN(t)$ ,  $sB = sB(t)$ , 其意义分别如下:  $S = S(t)$  表示图像上纹理坐标(0.5,  $t$ )的像素与曲线上的弧长参数为  $t$  的点建立对应关系,即叶子的中脉附着到曲线上;  $sN = sN(t)$  表示图像上纹理坐标为 ( $s, t$ ) 的点与曲线上弧长参数为  $t$  的对应点沿曲线的局部标架  $N$  方向的缩放关系,用于控制玉米叶子的中脉两边的叶片沿着中脉翘曲的程度;  $sB = sB(t)$  表示图像上纹理坐标为 ( $s, t$ ) 的点与曲线上弧长参数为  $t$  的对应点沿曲线的局部标架  $B$  方向的缩放,用于控制叶子的长宽比例。

根据上述 3 个函数,将纹理图像嵌入到曲线的具体映射过程如下:

(1) 设叶子纹理图像的宽为  $imageWidth$ , 高为  $imageHeight$ , 叶脉曲线的总弧长为  $sumArcLength$ 。如果叶子的长宽比例不发生变化,则在  $B$  方向的总的缩放比例为

$$sB = sB(t) \equiv imageHeight / imageWidth \times sumArcLength \quad (5)$$

其中,  $B$  的正负方向的缩放比例为  $0.5sB$ 。

(2) 对曲线上所有采样点的弧长参数  $t$ , 分别确定纹理坐标为(0,  $t$ ), (0.5,  $t$ )和(1,  $t$ )的对应点,算法如下:

1) 纹理坐标为(0.5,  $t$ )的点的坐标位置即为曲线上弧长参数为  $t$  的点,记为  $P(0.5, t)$ ;

2) 纹理坐标为(0,  $t$ ), (1,  $t$ )的对应点  $P(0, t)$ ,  $P(1, t)$  的计算如下:

如果叶子左右两边缩放的比例一致,则

$$P(0, t) = P(0.5, t) - sB_L(t) \cdot B(t) + sN_L(t) \cdot N(t) \quad (6)$$

$$P(1, t) = P(0.5, t) + sB_R(t) \cdot B(t) + sN_R(t) \cdot N(t) \quad (7)$$

其中,  $sB_L(t)$ 、 $sB_R(t)$  分别为叶子中脉两边的纹理图像在变形参数曲线局部坐标架  $B$  正负方向的缩放比例;  $sN_L(t)$ 、 $sN_R(t)$  为叶子中脉两边的纹理图像相对于中脉在  $N$  方向的缩放比例,用于控制中脉两边的叶子的翘曲程度。

如果  $sN_L(t) = sN_R(t) = 0$ , 则根据叶子的实际形状,  $P(0, t)$ ,  $P(0.5, t)$ ,  $P(1, t)$  的法向可取  $N$  的反方向。

如果  $sB_L(t) = sB_R(t) = 0.5sB$ , 其中,  $sB$  如式(5)所示,且  $sN_L(t) = sN_R(t) = 0$ , 则可实现叶子的长宽等比例缩放。

3) 分别把由上述计算所得叶子中脉两边的点用四边形连接起来,再把上面预处理的具有不透明度的叶子纹理映射到四边形连成的物体上,并采用 OpenGL 的  $\alpha$  校验对叶子图像的背景做透明处理。取不同的参数曲线来表示叶子中脉的空间变形形状,就可实现同一叶子的不同弯曲程度,选取不同的局部标架在  $N, B$  方向的缩放比例,就可控制叶子的长宽比例和翘曲程度。

用该方法造型叶子比较简单,且保留了叶子的细节,如脉络等。同时叶子的轮廓线可简单地得到。因此,用该方法得到的玉米叶子具有较好的真实感,如图 3 所示。算法的伪代码如下:

```
Draw(float z_near)
{
```

```
SubTreeDraw(四叉树总的根结点, z_near);
}
SubTreeDraw(父结点 pRoot, float z_near)
{
    if(pRoot 已经没有子节点) //已经到最精细的采样层
        Drawpoint(); //绘制点
    else if( Area_origin * z_near^2 < 1)
        Drawpoint(); //绘制点
    else //这层节点不满足绘制条件
    {
        //继续遍历这棵四叉树
        for(int i=0; i<pRoot->getChildCount(); i++)
            SubTreeDraw(pRoot->getChildAt(i), z_near);
    }
}
```



图 3 玉米叶片轮廓

### 2.3 阴影的实现

当观察方向与光源方向相同时,观察者看不到任何阴影,但两者不一致时就会出现阴影。阴影可以表现出图像上景物的远近和相对方向,从而极大地增强了图像的真实感<sup>[11]</sup>。

求光源(点光源)范围中,任意一个面  $S$  上的阴影的计算:投影矩阵:

$$M = (a \ b \ c \ d) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ q \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} \cdot (x \ y \ z \ q)$$

$$= \begin{pmatrix} by + cz + dq & -ay & -az & -aq \\ -bx & ax + cz + dq & -bz & -bq \\ -cx & -cy & ax + by + dq & -cq \\ -dx & -dy & -dz & ax + by + cz \end{pmatrix}$$

其算法描述如下:

设该平面为( $a, b, c, d$ )

For 每个光源  $L_i$

位置  $P_i$  为( $X_i, Y_i, Z_i$ )

For 物体的每个面  $S_i$

计算出面中各个顶点在目的面上的投影

得到投影后的面  $S_i'$

$$S_i' = S' \cup S_i'$$

得到关于光源  $L_i$  的阴影面  $S_i'' = S \cap S_i'$

### 3 结束语

虚拟植物模型的研究始于 20 世纪 60 年代末,在过去的 30 多年里,植物生长的建模、仿真与可视化研究和应用已经得到了相当程度的发展。但大多数模型都有明显的缺点,需要进一步的改进和完善。最有效的途径之一便是将已经测试过的模型进行优化组合,去粗取精,并扩充其发展,主要包括增加生理生态过程的定量描述,在提高预测性的基础上增

(下转第 242 页)