

基于时变纹元的真实感草地枯萎模拟*

焦少慧^{1,2,4+}, 杨刚³, HENG Pheng-Ann^{4,5}, 吴恩华^{1,2,6}

¹(中国科学院 软件研究所 计算机科学国家重点实验室,北京 100190)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

³(北京林业大学,北京 100083)

⁴(中国科学院 深圳先进技术研究院 人机交互研究中心,广东 深圳 518067)

⁵(香港中文大学 计算机科学与工程学系,香港)

⁶(澳门大学 科学技术学院 电脑与资讯科学系,澳门)

Realistic Grass Withering Simulation Based on Time-Varying Texels

JIAO Shao-Hui^{1,2,4+}, YANG Gang³, HENG Pheng-Ann^{4,5}, WU En-Hua^{1,2,6}

¹(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

⁴(Human-Computer Interaction Research Center, Shenzhen Institute of Advanced Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518067, China)

⁵(Department of Computer Science and Engineering, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

⁶(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China)

+ Corresponding author: E-mail: jsh@ios.ac.cn

Jiao SH, Yang G, Heng PA, Wu EH. Realistic grass withering simulation based on time-varying texels. *Journal of Software*, 2010,21(9):2224–2236. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3719.htm>

Abstract: In this paper, a technique called Time-Varying Texel (TVT) is presented for simulating the withering effects of grassland. Time-Varying Texel is defined as an extension of the traditional texel structure by adding a time dimension, where the texel at different time is computed by using a Texel Deformation Technique. In this approach, a point based structure (PBS) is employed in combination with the Time-Varying Texel. Through the introduction of PBS as a bridge, a Physical-biological Model can be applied to handling the deformation at the grass texel. In addition, a mingling algorithm is applied to enhance the diversity of grassland, and the LOD representation of TVT is developed for promoting efficiency. Experimental results show that the realistic grass time-varying simulation is well achieved with the proposed techniques.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60833007, 60773030, 60973066 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2009CB320802 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA10Z232 (国家高技术研究发展计划(863)); the Research Grant of University of Macau of China (澳门大学研究基金); the Research Grant of LCS, ISCAS of China under Grant No.SYSKF0705 (中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室开放课题基金)

Received 2009-03-31; Revised 2009-07-07; Accepted 2009-08-19

Key words: time-varying texel; texel deformation; point-based model; physical-biological model; weathering degree

摘要: 对表示复杂自然物体的纹元(texel)方法进行扩展,提出时变纹元的概念,以模拟草叶、毛发等自然物体随时间而变化的真实感效果。时变纹元内存储着自然物体随时间变化的纹元数据,从而可用于构建时变三维数据场,实现物体时变效果的模拟。采用一种纹元变形算法来生成时变纹元,该算法首先将基本纹元结构转化为点模型,然后对点模型进行动态模拟来生成时变数据,再将时变的点模型数据进行转化而得到时变纹元结构。运用时变纹元方法实现了草地随时间逐渐枯萎效果的真实感模拟。为了能够模拟草地枯萎变化过程中真实的形态、材质变化,基于物理学以及生物学原理构建了物理-生物模型来指导草地点模型的动态变化模拟,同时生成草地时变纹元。将所生成的草地时变纹元重复性地映射在地形网格上,就可以实现大规模草地场景枯萎效果的模拟。另外,在时变纹元映射过程中还应用了混合叠加算法来增加草地多样性,并运用 LOD 算法来提高绘制效率。实验结果表明,采用时变纹元方法可以成功实现草地时变效果的真实感模拟。

关键词: 时变纹元;纹元变形;点模型;物理-生物模型;时变度

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

草地是最为常见的自然景物之一,它通常以大面积情况出现,具有数量非常庞大的草叶个体。随着季节的变化,草地会经历绿草如茵、青黄相间、草枯叶黄等一系列随时间变化的状态,具有丰富多变的景观效果。如何对草地进行有效的建模与绘制,并对草地的时变过程进行模拟,是真实感自然景观表现的重要研究问题。草叶的枯萎是一个非常复杂的过程,草叶的几何形态和材质都会在枯萎过程中发生显著变化,而这些变化涉及到一系列相关的物理、生物机理。所以,草地的时变模拟也是计算机图形学中一个具有挑战性的课题。

由于草地所含草叶的数量巨大,采用显式的几何元素来表示细节复杂的草地非常困难。Kajiya 等人^[1]在 1989 年提出了采用体纹理来表示毛发的方法,其方法是采用一块三维体纹理来表示一片短毛,体纹理各个体元处记录着相应位置的密度和反射函数。这块三维体纹理即称为纹元(texel)。Kajiya 等人采用这种方法取得了非常逼真的毛发绘制效果。此后,许多研究者^[2-6]采用纹元结构来分别模拟森林、草地、毛发等细节丰富的自然物体。但迄今为止,有关纹元的研究均为静态纹元,即纹元结构不随时间而发生变化。

本文对纹元结构进行扩展,提出了时变纹元概念,即随时间变化的纹元结构。时变纹元存储随时间而变化的三维纹元数据阵列,可用于模拟草地等复杂自然物体随时间而变化的过程。时变纹元继承了纹元结构的所有优点:首先,其绘制效率仅与三维数据阵列的分辨率相关,而与所包含的草叶数目无关;其次,体绘制的方法可模拟出阴影和自阴影现象,生成逼真的绘制结果。

在生成草地时变纹元时,本文提出纹元变形算法,该算法结合点模型结构对纹元时变过程进行模拟。首先,将纹元结构转化为点模型,然后采用点模型对草叶枯萎过程进行动态模拟。点模型的动态变化数据将同步并行转换为相应的纹元结构,由此计算得到的一系列动态变化的纹元即组成了时变纹元结构。在构造草地纹元时,为模拟草叶的枯萎过程,本文分析了草叶进入秋季之后由于失水收缩导致形状变化的物理过程,以及叶绿素含量降低造成草叶由绿转黄的生物学过程,构建了物理-生物模型来模拟草叶枯萎过程中的形态变化与材质变化。获取时变纹元之后,将时变纹元结构重复映射到地形表面,就可模拟大面积草地逐渐枯萎的现象。

另外,在模拟过程中,本文还提出了一种混合叠加算法将多个时变纹元样本进行相加。采用混合叠加算法,草叶数目含量多的草地时变纹元就可以通过含量较低的时变纹元计算得到;而草叶数目少的时变纹元相比数目多的时变纹元对应点模型的规模小许多,这样可极大地提高草叶数目多的时变纹元的生成效率。此外,混合叠加算法能够有效模拟草地有黄有绿、有疏有密的现象,符合草地的真实情况。在绘制过程中,本文还采用了时变纹元的 LOD(level of detail)表示形式。压缩时变纹元结构可得到多级小分辨率的样本,根据草地与视点的距离而选择分辨率大小适宜的时变纹元进行映射,由此提高大规模草地的绘制效率。

本文第 1 节介绍草地模拟及时变模拟的相关研究工作。第 2 节结合草地的模拟介绍时变纹元的概念及纹元

变形算法.第3节给出模拟草地枯萎过程中的物理-生物模型,并讨论如何使用该模型来指导点模型的动态变化.第4节讲述混合叠加算法,并讨论草地时变纹元的LOD表示形式.最后给出实验结果和相关结论,并指出可能的未来工作.

1 相关工作

Kajiya 等人^[1]首先提出了采用一块三维体纹理来表示一片直立的短毛,这块三维体纹理即称为纹元(texel),纹元结构同样适用模拟草地这种多毛发状的物体,文献[2-5]等均采用纹元方法模拟了草地场景.但至今为止,有关纹元的研究均为静态纹元,即纹元结构不随时间发生变化.

文献[7-9]等探讨了草地的动态模拟,但他们的研究集中在模拟风吹草动和草叶动态复杂光照等方面.其中,文献[7,8]模拟了风吹草动的现象,可表现草叶在风力作用下的形态变化.他们采用不同方法,如 shell 结构、体纹理结构以及几何结构模拟草叶的动态形变;而文献[9]主要集中研究大规模场景的动态光照方面.据我们所知,至今没有真实感草地时变模拟方面的相关研究.而由于草叶本身的数目巨大,具有丰富细节以及时变过程的高度复杂性,时变模拟成为一项具有挑战性的工作.本文将详细讨论该项工作.

计算机图形学真实感绘制领域中,大部分绘制出来的场景均为静态场景,即场景中物体的几何形状和材质并不能随时间的变化而变化,这与自然界中的真实情况有很大差距.自然场景的时变模拟是近几年图形学研究的热点之一.时变模拟的工作已经开展有近 20 年,在很多特定的老化现象取得了较成功的研究:比如铁锈、发霉、水果腐烂、表面划痕和地形侵蚀^[10-14]等等.以上这些技术或侧重于基于相关物理知识进行时变建模和模拟,或基于数据驱动达到模拟时变物体的目的.但上述研究方法不能提供足够的相关生物信息来模拟一些具有生命表征的自然物体,如本文工作中所要模拟的草叶.在表现自然场景随季节而发生变化的情况下,成功的植物时变模拟能够极大地增强真实感,这正是真实感图形学所追求的重要目标之一.植物的时变现象涉及相关生物知识,不只需要物理模型,也同样需要应用相应的生物模型.文献[15-17]等分别研究及模拟树叶在季节变换过程中的颜色改变现象,构建了植物叶子内部的相关色素,如叶绿素、胡萝卜素随时间变化的生物模型,并应用于树叶材质变化的模拟之中.但上述工作较少关注树叶的具体形态变化.文献[18,19]对树叶季节变化过程中的材质和形态变化均有很好的研究和模拟,其结合叶脉形态构建弹簧模型,适宜模拟叶片的时变现象.但由于其模拟速率较低,从而难以应用于大规模场景.另外,上述自然物体的时变模拟研究大都侧重于考虑物体表面或者靠近表面一层结构的时变,而涉及物体内部的体构造的时变研究则相对缺乏.

2 时变纹元

2.1 纹元

Kajiya 等人^[1]提出的纹元,指用来近似表示许多微面总体特性如光学特性的一个三维参数数组,该三维参数数组的基本单位为体元.纹元数组空间中的任意一个体元都存储着如下 3 部分内容:(1) 密度标量 ρ , 表示该体元包含的所有微面的近似投影面积;(2) 标架 \mathbf{B} , 表示该体元中各微面的局部方向,分别是法向量场 \mathbf{n} 、切向量场 \mathbf{t} 和副法向量场 \mathbf{b} ;(3) 光照模型 Ψ ; 它决定将有多少光线从微面散射出来,表明体元包含的是何种曲面.最初纹元 T 包括 (ρ, \mathbf{B}, Ψ) 这 3 个部分,具体来说,每一个体元 $T(x, y, z)$ 存储散射密度 $\rho(x, y, z)$ 、标架 $\mathbf{B} = [\mathbf{n}(x, y, z), \mathbf{t}(x, y, z), \mathbf{b}(x, y, z)]$ 和一个双向光线反射场的函数 $\Psi: \Psi(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$.纹元的每个体元的透明度、反射函数或密度描述了该体元所在位置的所有几何细节的综合效果,因此这种方法有效克服了绘制时的混淆问题.并且,由于采用了体绘制方式,自阴影等效果也可以很好地模拟出来.这些特点使得纹元可以生成非常逼真的效果(如图 1 所示).

纹元结构可以通过对草地几何模型进行体素化处理得到.草叶几何模型表示为圆锥形状,大致符合现实情况,并可弥补片状草叶结构在视点改变时可能出现的误差.本文随机生成多棵草叶并排列于三维空间中以构成一小块草地,得到原始草地几何模型,再通过体素化该几何模型计算纹元中各属性值,得到初始纹元结构.这里,草叶纹元结构存储法向量场和切向量场代表标架量.而对于双向光线反射场函数来说,则简化存储为漫反射系

数 $md(x,y,z)$ 和镜面反射系数 $ms(x,y,z)$ 两项值。

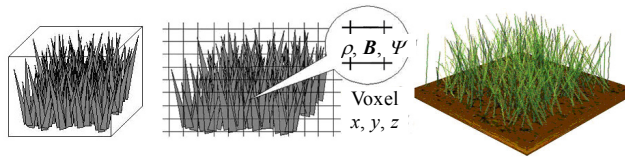


Fig.1 Illustration of grass structure and the rendering results

图 1 草地纹元示意图及绘制结果

2.2 时变纹元

现实世界中的物体都会随时间发生材质、形状的改变。比如,草地在秋季会逐渐变黄枯萎,沾水的毛发在空气中会慢慢变干,或者是灰尘逐渐累积在地毯等多纤维物体之上。为了模拟复杂自然物体的时变过程,本文提出了时变纹元 TVT(time-varying texel)的概念。时变纹元可以模拟纹元随时间变化的情况,本文在纹元结构中加入时间维,扩展纹元得到了时变纹元概念。时变纹元的定义为

$$TVT=T(x,y,z,wd),$$

其中, wd 表示时变度(weathering degree),是时间 t 的函数。而时变纹元就是随时间 t 变化的三维纹元数据场。易知,TVT 包括 $(\rho(t),B(t),\Psi(t))$ 这 3 部分属性值,即其密度标量、标架量、双向光线反射场函数均随时间发生变化。

获得初始纹元之后,可应用纹元变形算法计算出草地时变纹元,纹元变形算法将在第 2.3 节中详细介绍。生成草地的时变纹元后,就可将其重复性地映射到地形网格表面上并进行体绘制,从而模拟出草地枯萎过程中形态、材质的逐渐变化。图 2 为时变纹元的关键帧。

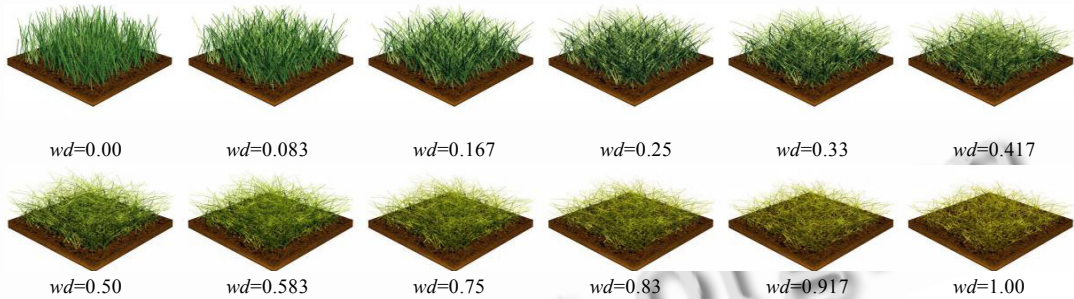


Fig.2 Key frames of grass TVT

图 2 草地时变纹元关键帧

2.3 纹元变形算法

如何生成时变纹元是本文需要解决的主要问题。本文采用纹元变形算法(texel deformation technique)来生成时变纹元。纹元变形算法可计算纹元各项属性值的变化,同时体现几何与材质的改变,这不同于文献[3]中的纹元动画算法,后者侧重使用 FFD 算法对纹元进行变形。纹元变形算法采用了点模型结构 PBS(point based structure)^[20]对纹元的时变过程进行模拟,这样可以很好地结合点模型结构和纹元结构的优点。点模型的优点在于其结构为离散的点结构,比纹元的规范三维数据场更加灵活,适于模拟动态物体。但其也存在模拟速度上的问题,即点模型的动态模拟会随着点的增多而导致速度逐渐变慢。由于草地含有丰富细节,这使得无法对整片草地全部使用点模型进行时变模拟,因为不仅动态模拟速率很慢,绘制速率也会很低。而纹元结构恰恰能够弥补这一缺点,其具有绘制效率仅与其分辨率有关而和所含草叶的个数无关的优点,并且我们可以只计算一块草地纹元并对其进行重复性地映射而生成大规模草地。

纹元变形算法首先采样草叶纹元结构得到其对应的点模型,继而应用物理-生物模型进行点模型的动态模拟,同时并行地将计算得到的动态点模型转换为相应的纹元结构,得到纹元的动态过程,最后将纹元的动态过程

存储为时变纹元结构.纹元变形算法流程图及生成草叶时变纹元的示意图如图 3 和图 4 所示.

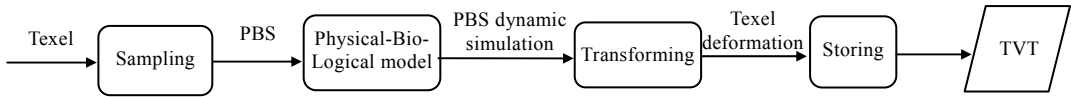


Fig.3 Flow chart for texel deformation algorithm

图 3 纹元变形算法流程图

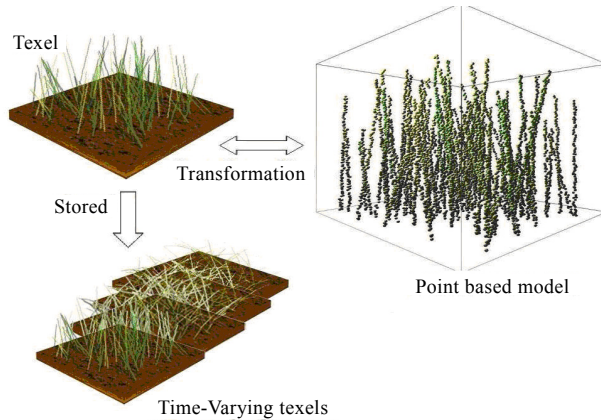


Fig.4 Acquiring the time-varying texels

图 4 时变纹元生成流程

首先介绍纹元结构到点模型的转换规则.本文应用采样的方法来生成纹元结构所对应的点模型,即在纹元空间中散布一些离散的采样点,每个采样点的属性值根据其位置处体元的属性值而计算得到,如图 5(a)所示.点模型中的每个点 p_i 存储如下属性值:位置 $S_i(s_x, s_y, s_z)$ 、法向 $N_i(s_x, s_y, s_z)$ 、切向 $T_i(t_x, t_y, t_z)$ 、材质 $M_i(md, ms)$ 和半径 r_i .体元 $T(x, y, z)$ 中点的数目与此体元处的体密度成一定比例,即

$$Num(x, y, z) = proportion \cdot \rho(x, y, z),$$

其中, $\rho(x, y, z)$ 是坐标为 (x, y, z) 处的体元的散射密度, $proportion$ 的值可由用户指定,它控制了每个体元中点的稠密情况, $proportion$ 值大则对应点的个数多,模拟变形结果准确,但是速度较慢.在本文的实验中, $proportion$ 最佳取值为 6.在采样过程中,每个点 p_i 在体元中的具体位置可以通过随机函数生成, $S_i(s_x, s_y, s_z) = S_i(rand[x, x+1], rand[y, y+1], rand[z, z+1])$; 点的法向、切向以及材质属性值直接继承此体元处的纹元相关属性.这里以法向量为例说明,有 $N_i(s_x, s_y, s_z) = n(x, y, z)$.另外,本文设定所有点的半径相同.

下面介绍点模型到纹元结构的转换规则,可如图 5(b)所示.纹元结构中每一体元的密度标量 $\rho(x, y, z)$ 的计算过程为

$$\rho(x, y, z) = \frac{\sum_i (\omega_i \cdot 1)}{proportion},$$

其中, ω_i 为每个点 p_i 的权值,其表达式为 $\omega_i = a \cdot \exp\left[-\frac{d(p_i, c)^2}{2\sigma^2}\right]$, $d(p_i, c)$ 表示每个点 p_i 与体元中心 c 的距离.这里加入高斯函数作为每个点的权值,可以获得更为平滑的结果.此外,点模型的法向、切向、材质等属性值同样可以应用高斯函数作为权值进行加权平均求得,如法向属性有转换关系:

$$n(x, y, z) = \frac{\sum_i [\omega_i \cdot N_i(s_x, s_y, s_z)]}{Num(x, y, z)}.$$

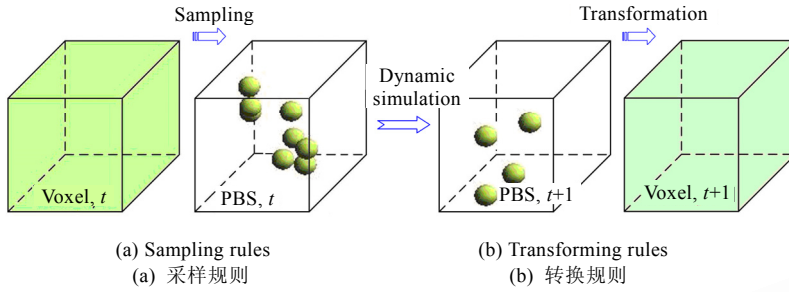


Fig.5 Illustration for transformations of texel and PBS

图 5 纹元与点模型的转换规则示意图

接下来讨论如何计算点模型的动态模拟过程.为了更好地记录点的动态过程,我们对每个点 p_i 增加定义属性,分别是:位移 $\mathbf{x}_i = \mathbf{S}_i(x_i, y_i, z_i)$ 、速度 \mathbf{v}_i 、质量 m_i 以及受力 \mathbf{f}_i .这里定义所有点的质量相同.点模型动态模拟的算法见算法 1.

算法 1. 点模型动态模拟算法(point dynamic simulation).

```

for ( $i=0$ ;  $i < N$ ;  $i++$ )           //对于点模型的每个点,  $N$  为点模型的规模数目
{
    calculate the initial  $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i$ ;    //确定每个点  $p_i$  的初始位移和速度
    while ( $t < \text{Time}$ ) do           //在预定时长 Time 之内
    {
        calculate the  $\mathbf{f}_i$ ;           //根据物理-生物模型计算点  $p_i$  的合力
        update  $\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_i$ ;           //根据  $[\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}'_i] = [\mathbf{x}'_i, \mathbf{f}_i / m_i]$  计算点  $p_i$  的更新位移和速度
        update  $N_i, \mathbf{T}_i$ ;           //更新点  $p_i$  的法向量和切向量
        update  $M_i(md, ms)$ ;         //根据物理-生物模型更新  $p_i$  的材质值
        if ( $d(p_i, p_j) < \text{threshold}$ )
            combine  $p_i$  and  $p_j$ ;    //如果两点距离小于阈值,合并两点
         $t = t + 1$ ;                   //更新为下一时刻
    }
}

```

上述算法涉及到的一些过程将在下面进行详细讨论.我们通过公式 $[\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}'_i] = [\mathbf{x}'_i, \mathbf{f}_i / m_i]$ 计算点的速度和位移,而点 p_i 的法向量 N_i 和切向量 T_i 的更新过程如图 6(a)所示. t 时刻两点为 $p_i(t)$ 和 $p_j(t)$, 而 $t+1$ 时刻表示为 $p_i(t+1), p_j(t+1)$. t 时刻点 i 和点 j 的切向量为 $\mathbf{T}_i(t)(t_x(t), t_y(t), t_z(t))$ 和 $\mathbf{T}_j(t)(t_x(t), t_y(t), t_z(t))$; i 点在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的位置为 $\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{S}_i(t)(s_x(t), s_y(t), s_z(t))$ 和 $\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{S}_i(t+1)(s_x(t+1), s_y(t+1), s_z(t+1))$. 下面列出切向量的更新过程,法向量更新类似.

$$t_x(t+1) = \left[s_x(t+1) - \left(s_x(t) - t_x(t) \cdot \frac{s_z(t)}{t_z(t)} \right) \right],$$

$$t_y(t+1) = \left[s_y(t+1) - \left(s_y(t) - t_y(t) \cdot \frac{s_z(t)}{t_z(t)} \right) \right],$$

$$t_z(t+1) = s_z(t+1),$$

则有 $\mathbf{T}_i(t+1) = \frac{1}{\sqrt{t_x(t+1)^2 + t_y(t+1)^2 + t_z(t+1)^2}} (t_x(t+1), t_y(t+1), t_z(t+1))$. 当两个点 p_i, p_j 距离小于一定阈值时,需要合并两个点,相应的属性值按如下计算:

$$N_i = \frac{m_i}{m_i + m_j} \cdot N_i + \frac{m_j}{m_i + m_j} \cdot N_j,$$

$$T_i = \frac{m_i}{m_i + m_j} \cdot T_i + \frac{m_j}{m_i + m_j} \cdot T_j,$$

$$M_i = \frac{m_i}{m_i + m_j} \cdot M_i + \frac{m_j}{m_i + m_j} \cdot M_j.$$

图 7 为时变纹元的关键帧和相应的点模型结构。

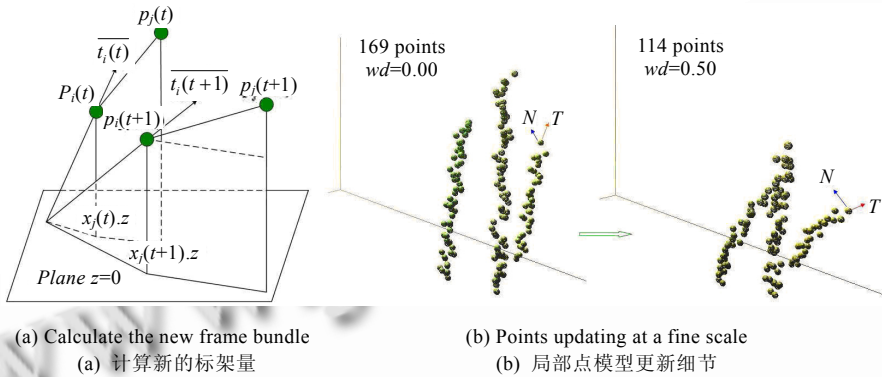


Fig.6 Updated details of point based structure
图 6 点模型更新细节

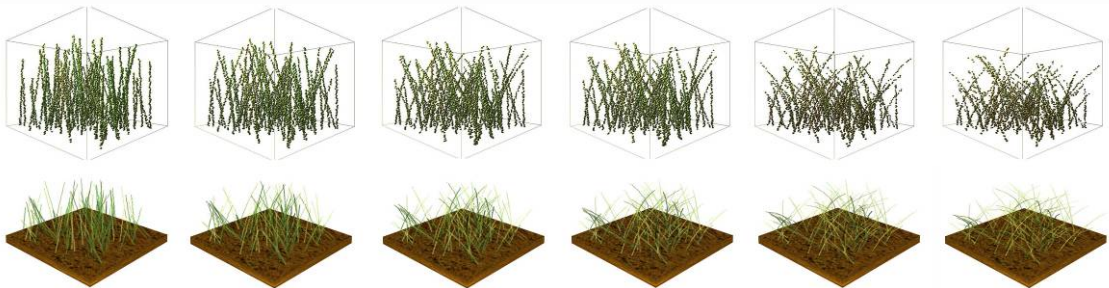


Fig.7 Point dynamic simulation and the corresponding TVT
图 7 点模型动态模拟及对应时变纹元

3 物理-生物模型

本文通过构建草叶枯萎变黄过程的物理-生物模型来指导点模型的动态模拟.物理-生物模型可分为几何形变和材质改变两部分.

3.1 几何形变

进入秋季,草叶逐渐流失水分,开始呈现枯萎状态;同时,由于草叶自身支撑力减少,叶片会在重力作用下逐渐下落弯曲.下文将详细讲解这两个方面的相关物理模型.

草叶会随时间发生萎缩,草叶中水分含量的减少会引起草叶细胞的初始应变.我们将草叶细胞分为叶脉细胞和叶肉细胞,这两者具有不同的初始应变. $\epsilon_{0,v} = \frac{\Delta V_v}{V_{0,v}}$ 和 $\epsilon_{0,m} = \frac{\Delta V_m}{V_{0,m}}$ 分别代表叶脉细胞和叶肉细胞的初始应变,其中: ΔV_v 和 ΔV_m 分别代表叶脉细胞和叶肉细胞的体积变化量;而 $V_{0,v}$ 和 $V_{0,m}$ 分别代表初始体积值.因此,我们需要计算草叶细胞的体积变化量求得初始应变.草叶细胞的体积减少主要归因于水分含量的减少,因此我们可通

过计算水分含量的变化来得到体积变化量,即 $\Delta V_v=k_v \cdot \Delta w(t)$ 和 $\Delta V_m=k_m \cdot \Delta w(t)$.其中,函数 $\Delta w(t)$ 的值表示草叶含水量的变化,可由水分含量的生物模型计算得到.另外, k_v 和 k_m 为设定的比例参数,这里 $k_v < k_m$.这样设定的原因是草叶的叶脉结构相比叶肉细胞含有较多的细胞壁和较少的细胞液,而细胞壁可阻碍水分的流失,所以在同等失水情况下,叶脉细胞发生的体积改变量要小于叶肉细胞.当求得草叶细胞的初始应变之后,我们便可计算其应力和应变的值.叶脉处应力和叶肉处应力分别为: $\sigma_v=E_v \cdot \epsilon_v$ 和 $\sigma_m=E_m \cdot \epsilon_m$,其中: E_v 和 E_m 分别对应叶脉处和叶肉处的弹性模量; ϵ_v 和 ϵ_m 则分别为叶脉处和叶肉处的应变,也可理解为草叶萎缩的程度.

下面考虑如何将上述物理分析作用于点模型结构之上.在生成草地初始纹元时,假定草叶为圆锥形状,则圆锥的轴线代表叶脉.另外,在纹元结构中,整根草叶所包含的所有体元的切向方向为圆锥轴线方向,即草叶叶脉的切向量;体元的法向方向为轴线到此体元的矢量方向.同样,我们可以在点模型结构中以法向量的大小区分叶脉细胞和叶肉细胞:即法向量为0,代表叶脉细胞,而法向量处不为0,则代表叶肉细胞.此外值得注意的是,草叶细胞的弹性模量是各项异性的,则有 $E_v < E_m$.这是因为叶脉细胞由于其含有较多的细胞壁,其抵抗弹性形变的能力要显著大于叶肉细胞的抵抗弹性形变能力.并且随着时间的推后,草叶的弹性模量系数 E_v 和 E_m 会逐渐变大,表现为草叶的萎缩变形将逐渐变小,从而萎缩过程会慢慢停止而逐渐达到平衡状态.

另一方面,叶片由于重力作用而逐渐下落弯曲.这里,我们采用简化的物理模型,如图8所示.草叶某处 q 点受到重力 G ,此点处所受合力为 F , v 为此点可能的运动方向.在相应点模型结构中, q 处对应点模型中的点 p_i ,其合力为 f_i ,那么此点对应的加速度为 f_i/m_i , v_i 为 p_i 点的线速度.由于草叶根部位置保持不变,草叶上的其余点运动可视为绕草根进行的圆周运动.这里,我们引入角速度 ω_i ,则有线速度大小 $v_i = \omega_i \cdot l_i$,其中, ω_i 代表点 p_i 的角速度, l_i 为点 p_i 到草叶根部的距离.在初始时刻,即 $wd=0$ 时,草叶形态近似垂直于地面,因此可有 $l_i=h_i$ 的近似关系.这里, h_i 为初始时刻点 p_i 距离地面的高度,易知 $h_i=s_{i,z}$,即点 p_i 在初始时刻所处三维坐标的 z 分量.值得注意的是,叶片上的角速度不尽相同,表现为叶片在下落的同时还会发生弯曲变化,其中,叶尖附近的角速度大于叶根附近的角速度.因此,我们定义下落角速度 $\omega_i = \omega \cdot \frac{1}{h_i^2}$ 以模拟草叶弯曲下落的过程.

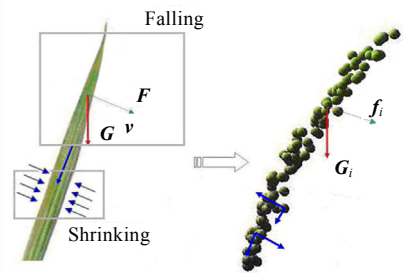


Fig.8 Physical analysis and points deformation
图8 物理受力分析图

草叶的水分含量和草叶的时变形态有很大关系.因此,本文应用草叶水分含量变化的生物模型^[21,22],根据该生物模型构建标准水分含量变化曲线,以表示时变过程中水分含量的变化情况.如图9(b)中曲线.同时,我们还考虑水分相对充足和温度较低时的特殊情况,构建两条水分含量变化曲线分别代表这两种情况,可分别如图9(b)中的虚线和点划线.

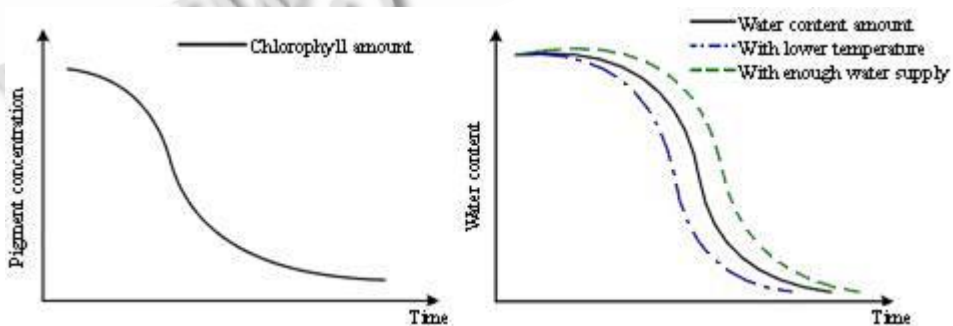


Fig.9 Chlorophyll concentration curve and water content curve
图9 叶绿素变化曲线和水分含量变化曲线

3.2 材质变化

随着秋季的到来,草叶会慢慢由绿转黄,这是因为草叶细胞中叶绿素含量逐渐较少.因此,基于植物色素生物模型^[15-17],并主要考虑叶绿素的变化,建立了草叶色素含量与叶片颜色材质之间的关系.考虑叶绿素是因为:草叶细胞中基本不含花青素,即叶片不会出现红色及紫色等颜色,影响其叶片颜色的仅有叶绿素和胡萝卜素.其中:叶绿素包含叶绿素 *a* 和叶绿素 *b*,分别表现蓝绿色和黄绿色;胡萝卜素表现为橘黄色.在草叶枯萎过程中,胡萝卜素变化很小.本文简化植物色素生物模型,令胡萝卜素含量恒定,这样只需根据叶绿素随时间的变化量以及相应的光谱模型计算得到叶片材质变化.根据文献[22],草叶所含色素的初始比例为 $P_{chla}:P_{chlb}:P_c=27:9:4$,其中, P_{chla} , P_{chlb} 和 P_c 分表表示叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和胡萝卜素的比,此比例会因为叶绿素含量的降低发生变化.图 9(a)为叶绿素含量随时间变化的生物模型.

草叶的颜色值可由相关植物色素含量以及相关光学理论计算得到.首先计算叶绿素吸收的光谱和总光谱的差值,得到叶片的反射光谱的表达式:

$$R(\lambda)=L(\lambda)-[P_c \cdot C(\lambda)+(P_{chla} \cdot Chla(\lambda)+P_{chlb} \cdot Chlb(\lambda))],$$

其中: $L(\lambda)$ 表示太阳总光谱; $C(\lambda)$, $Chla(\lambda)$ 和 $Chlb(\lambda)$ 分别代表胡萝卜素、叶绿素 *a* 和叶绿素 *b* 的吸收光谱,具体光谱数据依据文献[23]得到; $[P_c \cdot C(\lambda)+(P_{chla} \cdot Chla(\lambda)+P_{chlb} \cdot Chlb(\lambda))]$ 则表示叶片总吸收光谱.计算叶片发射光谱的过程如图 10 所示.获得草叶的反射光谱之后,草叶的颜色值可以依据反射光谱和物体颜色值转换的相关光学规则进行计算得到,这里不再赘述.

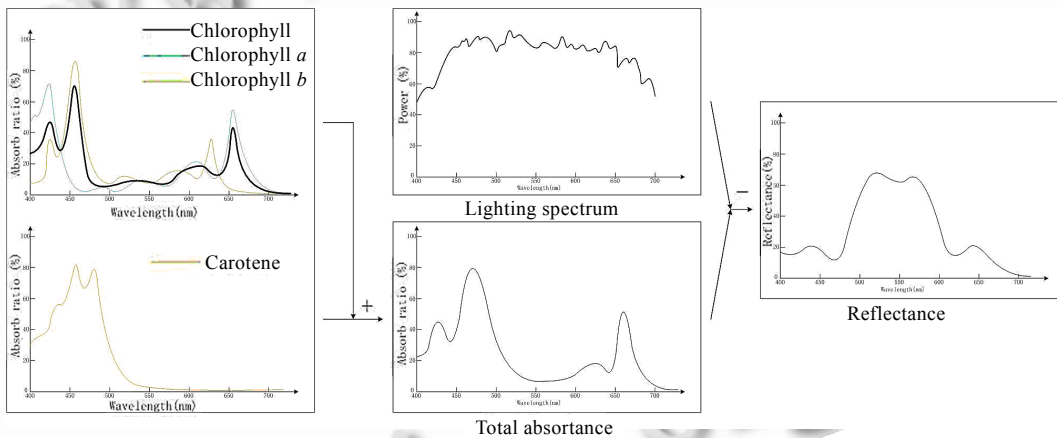


Fig.10 Illustration of the seasonal color calculation procedure

图 10 计算草叶时变材质变化流程示意图

4 实现细节

4.1 混合叠加算法

本文构建混合叠加算法(mingling algorithm)计算多个低密度草地时变纹元样本的相加,以此获得包含更多草叶的高密度草地时变纹元.混合叠加算法的好处首先是草叶数目含量多的草地时变纹元可以通过含量较低的时变纹元样本相加得到.由于低密度草地时变纹元相比高密度草地时变纹元对应的点模型规模小许多,所以计算低密度时变纹元的点模型动态模拟效率会更加高效.之后,经过混合叠加算法获得高密度时变纹元,可以避免大规模的点模型动态模拟,极大地提高了高密度草地时变纹元的生成效率.如我们可计算 7 组时变纹元,每组时变纹元仅含 100 根草叶,则动态模拟中点模型的规模仅对应于 100 根草叶的标准,然后采用混合叠加算法对这 7 组时变纹元样本进行计算,可获得新的草叶时变纹元,其草叶根数范围便可以达到 100~700 之间.第 2 个好处于混合叠加算法还可模拟出草地的多样性,即有黄有绿、有疏有密的情况.纹元相加算法控制各个时变纹

元的叠加函数 $Mg_i(wd)$.其函数具体形式由用户交互设定,为时变纹元样本的老化速率函数.混合叠加算法使得叠加结果中某个时变度的纹元可以通过混合各个样本中不同时变度的纹元得到,这样更加符合自然界的现实情况.即同一块草地各个草叶的老化速度是不同的,某一时刻会出现同时含有绿草和枯黄草的情况.混合叠加算法见算法 2.

算法 2. 混合叠加算法(mingling algorithm).

```

for ( $i=0$ ;  $i<K$ ;  $i++$ ) { //计算  $K$  个时变纹元样本的混合叠加
    determine  $Mg_i$ ; //确定第  $i$  个时变纹元样本的叠加函数  $Mg_i(wd)$ 
     $wd_i=Mg_i(wd)$ ; //计算第  $i$  个时变纹元对应的时变度  $wd_i$ 
    for ( $x=0$ ;  $x<Dim_x$ ;  $x++$ )
        for ( $y=0$ ;  $y<Dim_y$ ;  $y++$ )
            for ( $z=0$ ;  $z<Dim_z$ ;  $z++$ ) { //对于时变纹元的每一个体元  $T(x,y,z)$ 
                 $\rho(x,y,z,wd) = \sum_{i=1:K} \rho_i(x,y,z,wd_i)$ ; //计算叠加时变纹元的散射密度
                //混合叠加时变纹元的标架量
                 $n(x,y,z,wd) = \sum_{i=1:K} [n_i(x,y,z,wd_i) \cdot \rho_i(x,y,z,wd_i)] / \rho(x,y,z,wd)$ ;
                 $t(x,y,z,wd) = \sum_{i=1:K} [t_i(x,y,z,wd_i) \cdot \rho_i(x,y,z,wd_i)] / \rho(x,y,z,wd)$ ;
                //混合叠加时变纹元的颜色材质值
                 $md(x,y,z,wd) = \sum_{i=1:K} [md_i(x,y,z,wd_i) \cdot \rho_i(x,y,z,wd_i)] / \rho(x,y,z,wd)$ ;
                 $ms(x,y,z,wd) = \sum_{i=1:K} [ms_i(x,y,z,wd_i) \cdot \rho_i(x,y,z,wd_i)] / \rho(x,y,z,wd)$ ;
            }
    
```

图 11 为混合叠加算法的示意图,图中 t_1 和 t_2 两行给出不同叠加函数作用下的混合叠加结果. b_1, b_2 和 b_3 这三行对比混合叠加算法的结果,其中: b_1 与 b_2 是不同叠加函数混合得到的两个时变纹元对比,两者均包含 700 根草叶; b_3 则为包含 300 根草叶的混合叠加效果.结果表明,我们构建的混合叠加算法可以成功模拟自然界中草地有疏有密、黄绿相间的场景,提高真实感.

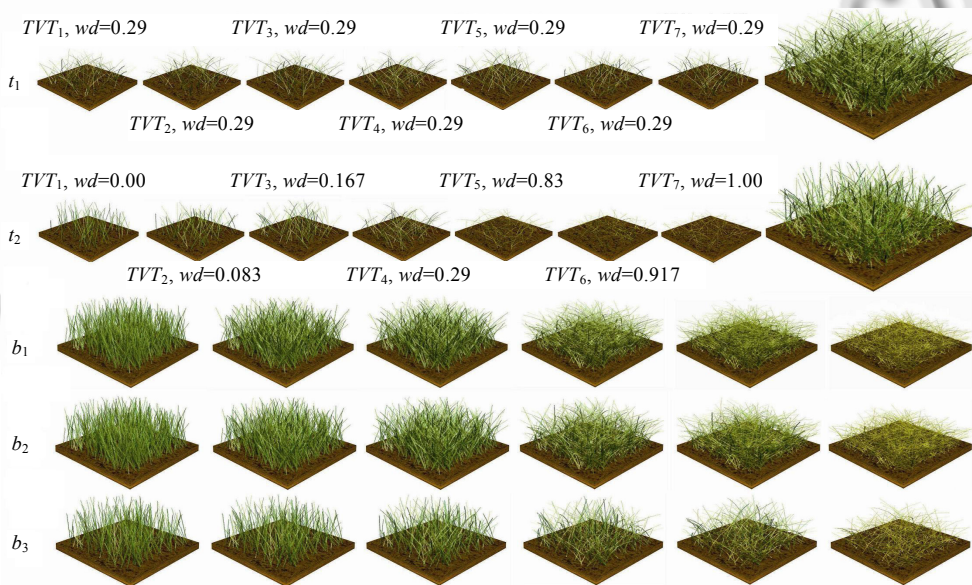


Fig.11 Mingling algorithm
图 11 混合叠加算法示意图

4.2 纹元的多层次细节表达

获得时变纹元后,我们可将其贴于任意地形网格并绘制得到草地场景的模拟结果.为了提高绘制效率,我们采用了多层次细节(level of detail,简称 LOD)的方法,即将时变纹元结构压缩为多级较低分辨率的样本,如分辨率为 256^3 的时变纹元就被压缩到 $128^3, 64^3, 32^3$ 等不同的低分辨率.然后,在将时变纹元映射于地形网格之上时,根据地形网格与视点之间的距离选择分辨率大小适宜的时变纹元进行映射.近处映射高分辨率的时变纹元,而远处就选择低分辨率的纹元,这样可提高大规模草地的绘制效率.可如图 12 所示.

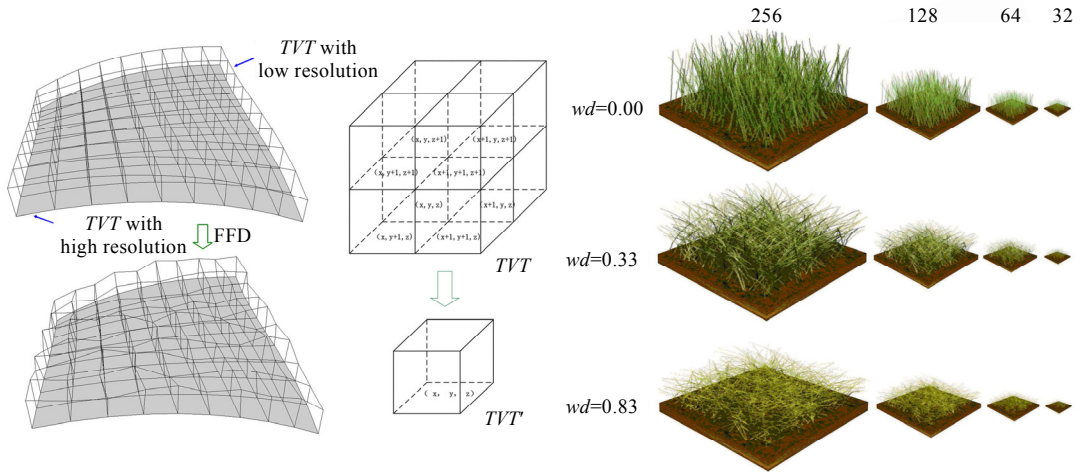


Fig.12 Mapping to the terrain and the LOD algorithm
图 12 映射地形和 LOD 示意图

5 实验结果和分析

草地时变结果如图 13、图 14 所示.本文对于草地时变纹元采用体绘制进行绘制,而对于整个场景采用光线跟踪的方式.图 13 为在山脉处的草地地形,包含 6 400 块时变纹元,每个时变纹元包含 400 根草叶,场景的总草叶数目为 2 560 000.图 14 为山坡处的草地地形.上述结果表明,本文方法能够很好地模拟草地的时变现象,生成具有真实感的时变序列.本文的结果视频在“基于时变纹元的真实感草地模拟.avi”中.

对于分辨率为 256^3 、包含 100 棵草叶的时变纹元的生成,算法的时间分析如下:首先,从初始纹元结构采样得到点模型平均耗时 0.22s,生成点模型规模大约为 5 000 个点;其次,在点模型的动态模拟过程中,每个时间步更新各个点运动状态及计算得到新的点模型平均耗时 6.3s;最后,将点模型的动态变化过程转换并存储为时变纹元结构耗时 2.61s.以上结果均在配置为 Intel 双核 CPU,2.40GHz 主频,8GB 内存,显卡为 NVIDIA GeForce 9800 的机器上运行得到.

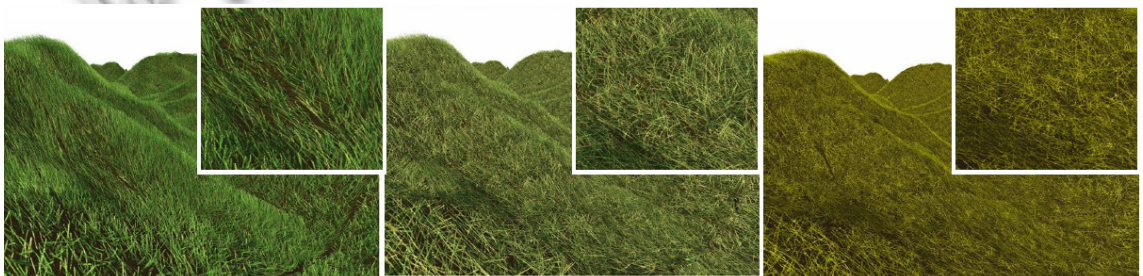


Fig.13 Time-Varying simulation results of the mountain at weathering degrees of 0.00, 0.30 and 0.917 respectively
图 13 山脉地形草地时变模拟结果,时变度分别为 0.00,0.30 和 0.917



Fig. 14 Time-Varying simulation results of the hillside

图 14 山坡地形草地时变模拟结果

6 结论和未来工作

本文主要贡献为:首先,扩展纹元结构提出了时变纹元的概念,能够描述草地等复杂自然物体的时变过程;其次,提出了一种纹元变形算法用于时变纹元的生成;最后,基于相关物理学、生物学原理构建了物理-生物模型,实现草叶枯萎过程中形态及材质变化的动态模拟.结果证明,本文算法可以很好地模拟草叶进入秋季以后枯萎变黄的情况,并具有高度真实感.

在采用纹元变形算法生成时变纹元时,我们引入点模型结构来实现纹元的动态模拟.这种方式创造性地结合了两者的优点,使得纹元变形算法能够高效率地模拟毛发状物体的复杂变形.另外,本文提出的混合叠加算法提高了获取高密度时变纹元的速度.我们首先计算低密度草叶时变纹元,这样动态点模型模拟的效率很高.之后,再叠加多个低密度草叶时变纹元,混合得到高密度草叶时变纹元.此时,不管时变纹元含有草叶的密度如何,其绘制效率是不变的.

实验结果表明,我们的算法可以高效率地模拟草叶的枯萎过程,并且能够体现出草地的多样性.通过我们的工作,模拟出具有高度真实感的草地时变场景,很好地增强了自然场景的真实感,并且可用于虚拟现实等多个领域之中.其不足之处是,采用体绘制的方法导致绘制效率较慢和时变纹元的存储量过大.

本文可能的后续工作为采用数据驱动的方法获得时变纹元,以及把 TVT 推广到其他领域,如动物皮毛的时变模拟.

References:

- [1] Kajiya JT, Kay TL. Rendering fur with three dimensional textures. In: Proc. of the SIGGRAPH'89. 1989. 271–280. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=74361&dl=GUIDE&coll=GUIDE&CFID=98520885&CFTOKEN=96245016>
- [2] Decaudin P, Neyret F. Rendering forest scenes in real-time. In: Proc. of the Eurographics Symp. on Rendering. 2004. 93–102. <http://www.evasion.imag.fr/Publications/2004/DN04/>
- [3] Neyret F. Synthesizing verdant landscapes using volumetric textures. In: Proc. of the Eurographics Rendering Workshop. 1996. 215–224. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=275481>
- [4] Neyret F. Modeling, animating, and rendering complex scenes using volumetric textures. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 1998,44:55–70. [doi: 10.1109/2945.675652]
- [5] Chen YY, Lin H, Sun HQ, Wu EH. Construction and realistic rendering of highly-complex plants scene. Chinese Journal of Computers, 2000,23(9):925–930 (in Chinese with English abstract).
- [6] Yang G, Fei GZ, Wu EH. Real-Time fur with biological pattern. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(9):1244–1249 (in Chinese with English abstract).
- [7] Bkeley B, Lalonde P, Heidrich W. Real time animated grass. In: Drettakis G, Seidel HP, eds. Proc. of the Eurographics 2002. Saarbrücken: the Eurographics Association, 2002. 52–60.
- [8] Perbet F, Cani MP. Animating prairies in real-time. In: Spencer SN, ed. Proc. of the Symp. on Interactive 3D Graphics 2001. New York: ACM Press, 2001. 103–110.
- [9] Zhang HS, Hua W, Yu L, Bao HJ. Layered polynomial textures for real-time grassland rendering. Journal of Software, 2006,17(1): 85–92 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/85.htm> [doi: 10.1360/jos170085]

- [10] Dorsey J, Pedersen HK, Hanrahan P. Flow and changes in appearance. In: Proc. of the SIGGRAPH'96. 1996. 411–420. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=237280>
- [11] Dorsey J, Hanrahan P. Modeling and rendering of metallic patinas. In: Proc. of the SIGGRAPH'96. 1996. 387–396. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=237278>
- [12] Dorsey J, Edelman A, Jensen HW. Modeling and rendering of weathered stone. In: Proc. of the SIGGRAPH'99. 1999. 225–234. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=311560>
- [13] Gu J, Tu C, Ramamoorthi R, Belhumeur P, Matusik W, Nayar SK. Time-Varying surface appearance: Acquisition, modeling, and rendering. In: Proc. of the SIGGRAPH 2006. 2006. 762–771. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1141952>
- [14] Wang JP, Tong X, Lin A, Pan M, Wang C, Bao HJ. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials. ACM Trans. on Graphics, 2006,25(3):754–761. [doi: 10.1145/1141911.1141951]
- [15] Mochizuki S, Cai D, Komori T, Kimura H. Virtual autumn coloring system based on biological and fractal model. In: Proc. of the Pacific Graphics 2001. 2001. 348–354. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=883420>
- [16] Braitmaier M, Diepstrten J, Ertl T. Real-Time rendering of seasonal influenced trees. In: Proc. of the Theory and Practice of Computer Graphics. 2004. 152–159. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1314465
- [17] Zhou N, Dong WM. Realistic simulation of seasonal variant maples. In: Proc. of the PMA 2006. 2006. 295–301. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1382314>
- [18] Chi XY, Sheng B, Chen YY, Wu EH. Simulation of autumn leaves. In: Proc. of the SIGGRAPH 2007, ACM SIGGRAPH 2007 Posters. San Diego: ACM Press, 2006. 36. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1280760>
- [19] Chi XY, Sheng B, Chen YY, Wu EH. Physically based simulation of weathering plant leaves. Chinese Journal of Computers, 2009,32(2):221–230 (in Chinese with English abstract).
- [20] Rusinkiewicz S, Levoy M. Qsplat: A multiresolution point rendering system for large meshes. In: Proc. of the 17th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH 2000. 2000. 343–352. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=344779.344940>
- [21] Hu JL, Han LB. Study on water consumption law and irrigation scheduling of turf grass in Tianjin seashore region [Ph.D. Thesis]. 2006 (in Chinese with English abstract).
- [22] Wang Z. Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [23] William GH. Introduction to Plant Physiology. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1999. 125–141.

附中文参考文献:

- [5] 陈彦云,林琚,孙汉秋,吴恩华.高度复杂植物场景的构造和真实感绘制.计算机学报,2000,23(9):925–930.
- [6] 杨刚,费广正,吴恩华.实时绘制带斑纹的毛发.计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(9):1244–1249.
- [9] 张淮声,华炜,余莉,鲍虎军.基于层次多项式纹理的实时草地绘制.软件学报,2006,17(1):85–92. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/85.htm> [doi: 10.1360/jos170085]
- [19] 迟小羽,盛斌,陈彦云,吴恩华.基于物理的植物叶子形态变化过程仿真造型.计算机学报,2009,32(2):221–230.
- [21] 胡九林,韩烈保.天津滨海地区草坪耗水规律及灌溉制度研究[博士学位论文].2006.
- [22] 王忠.植物生理学.北京:中国农业出版社.2000.



焦少慧(1983—),女,陕西西安人,博士生,主要研究领域为计算机图形学,真实感时变模拟。



HENG Pheng-Ann,男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,医学可视化。



杨刚(1977—),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学。



吴恩华(1947—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,可视化,虚拟现实。