

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)08-1526-06

论文索引信息: 宋成芳, 杨颖振, 彭群生. 植物运动的层次式简化技术 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(8): 1526-1531

植物运动的层次式简化技术

宋成芳¹⁾, 杨颖振²⁾, 彭群生²⁾

¹⁾(武汉大学计算机学院, 武汉 430072) ²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 利用力学预计算方法生成植物运动的真实感动画需要对形变数据作有效简化和压缩。针对植物及其运动天然具有层级性的特点, 提出一种基于视觉感知层次的动态几何简化算法。依据植物的树型层级结构, 将各级“子树”的运动作高低频分解; “低频运动”表征“子树”的主体运动, “高频运动”即为运动细节。按“广度优先”遍历植物层级结构, 在某一“深度”(层级)上将所有“子树”的“低频运动”合成即获得原始运动在此层次的逼近。遍历深度递增将构成植物运动的渐进逼近; 递减则为植物运动的逐步抽象化, 这实质上实现了植物运动的细节层次控制。实验表明该算法可实现植物运动的高效简化和压缩, 利于生成大规模植物场景的真实感动画。

关键词: 植物模拟; 计算机动画; 动态几何简化; 运动压缩

Hierarchical approximation of plant motion

Song Chengfang¹⁾, Yang Yingzhen²⁾, Peng Qunsheng²⁾

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072 China)

²⁾(State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China)

Abstract: Decimation and compression of pre-computed deformation data is crucial to synthesize realistic animation of massive plants. In this paper, a motion simplification algorithm is proposed based on the observation that plants are of tree-like hierarchical structure inherently and move in a hierarchical mode. According to the hierarchy of a plant, the motions of its sub-trees in each depth are decomposed into low-frequency motion and high-frequency motion. The former denotes the dominant transformation of the plant within that sub-tree range and the latter contains residual deformation details. By breadth-first traversal of the hierarchy, the motion composed with low-frequency motions of all the sub-trees at a certain depth is the approximation of original motion at that depth. While traversal depth increased, the approximated motion would approach the original motion progressively and become more realistic, which results in a kind of levels of motion detail. The experimental results show that the presented scheme can simplify and compress the plant's motions efficiently, and is convenient for the realistic animation of a large-scale forest.

Keywords: plant; computer animation; geometric simplification; levels of motion detail

0 引言

植物是室外场景的重要组成部分。植物的计

算机模拟一直是计算机科学、植物学、数字农林业等领域的研究热点和难点之一。其中, 对植物常见的动态行为如“树在风中摇曳”等的视觉模拟是一个未尽的话题^[1]。常规的植物动态模拟一般构

收稿日期: 2010-08-13; 修回日期: 2010-10-16

基金项目: 教育部博士点基金项目(20090141120033); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金项目(09I01); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(6082016)。

第一作者简介: 宋成芳(1978—), 男, 讲师。2007年于浙江大学获计算机科学与技术专业博士学位, 主要研究方向为计算机图形学, 虚拟地理环境, 3D GIS。E-mail: chfsong@gmail.com。

建植物变形的简化物理模型,在线计算植物的形变序列。这类方法可提供很好的交互性,但在处理规模和真实感上较为有限。在影视特效、媒体广告等这一类应用中,观众对场景中植物运动的真实感与细致度期望颇高,前述方法难以满足要求,人们转而借助动力学预计算方法来合成更为逼真的植物动画。

动力学计算通常采用有限元模拟(finite-element simulation)方法精确计算植物在外力作用下的形变^[2]。为保证精度以及最终的动态真实感,需将植物枝干系统作高精度的有限元划分,再计算每一单元结点的位移矢量。而计算获得的高分辨率形变数据并不能为图形学直接可用,如何利用它高效地生成植物动画将面临如下问题:1)几何简化:有限元划分得到的单元均匀且密集,因此形变序列不适合直接用做图形表示和绘制,需要顾及且保留一定的运动特征与几何特征,将形变序列作大幅几何简化;2)运动细节层次:如果植物位于场景中的不同位置,须依植物距视点的远近呈现不同分辨率的运动,这要实现植物运动的细节层次控制。

上述问题主要涉及动态几何简化和运动压缩两方面。已有的动态几何简化算法大都以经典的网格简化算法如 QSlim^[3] 或 Progressive Mesh^[4] 为基础,如 Mohr^[5] 曾将 QSlim 算法将静态网格的误差二次矩阵 Q 推广到对网格序列的所有帧求和,以求得最小二乘最优的简化;Kircher 和 Garland^[6] 则在 QSlim 基础上推出一种新的“多尺度网格(multi-level mesh)”,以建立变形曲面的多分辨率表示。运动压缩算法则从数据分析与信号处理的角度进行运动简化和数据压缩。Lengyl 等人^[7] 首次将时变几何表达为矩阵的形式,从信号处理的角度,对时变几何进行编码压缩。这类算法都试图针对网格的动态特性、实现对特定形变敏感的简化,但算法的通用性有限,应用于植物的运动简化并不能取得良好的简化效果。

值得注意的是,植物具有形体上的特殊性,即其枝干天然形成树型多层分支结构,因而植物的运动或形变也呈现内在的层次性:子树范围内的运动具有一致性,子树的级别愈高(范围愈小)一致性愈显著。着眼于这一特性,探索针对层次性运动的高效简化和细节层次控制方法,提出一种基于视觉感知规律的层次式动态几何简化算法。

依据植物枝干的树状层级结构,对各级子树所辖区域的运动作“高低频”分解,“低频运动”以区域的整体仿射变换记录,表征区域的主体运动,“高频运动”则为运动细节,以子树的“低频运动”替代其原始运动即构成一种简化。在植物枝干的树型结构中按“广度优先”方式遍历,在某一“深度”(级别)上由全体“子树”的“低频运动”组合而得的“合成运动”,即是原始运动在此级别上的逼近。随着遍历深度的递增,“合成运动”愈来愈接近原始运动,将会构成植物运动的渐进逼近;反之,遍历深度递减时“合成运动”则表现为植物运动的逐步抽象化。这实质上是实现了植物运动的一种细节层次控制。实现上述算法并将其应用于大规模植物场景的真实感动画,实验表明算法可行且具有很好的简化效果和运行效率。

1 运动频率分解

1.1 视觉感知层次

人的视觉感知一般具有一定的层次性,即当一个物体或一幅画面出现在人的视野,人们首先会对其整体或全局产生一个概观认识,然后再去审视局部细节。对于物体运动的感知也存在类似的规律,人们也将首先观察到整体姿态变换,然后才去注意局部的变形细节。例如,在图1所示的布块中,人首先感觉到的是整块布的弯折(图1(a)),然后才去注意局部的皱起(图2(b))。

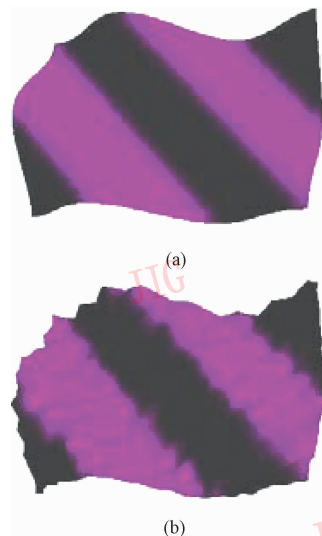


图1 布块运动的两个细节层次

Fig. 1 Two levels of motion detail of the deformed cloth

1.2 运动(形变)的高低频分解

与直观经验相对应,计算机图形学中这样理解:物体运动可分为低频和高频两种模式,低频运动表现为全局或整体上较为一致的变换(平移、旋转、拉伸等),高频运动则为局部细节变化(起伏、振荡等)。将运动在频率上作分解,即先求得一个表征低频运动的全局仿射变换,将仿射变换逆作用于原始运动(将低频成分“剥离”)获得高频运动。由于低频运动表现了原始运动的主体特征,因此全局仿射变换可作为原始运动的一种逼近和简化,而高频运动(“余差”)可用来衡量逼近的程度。在著名的“公鸡过马路(chicken crossing)”动画序列中,Shamir^[8]曾将动态网格中的一帧形变分解为高频形变和低频形变两种成分,其中低频成分为鸡身的扭转和伸缩,高频成分为翅膀的拍打、尾巴的摇摆等。图2直观地展示了这两类形变分离与组合的视觉效果。

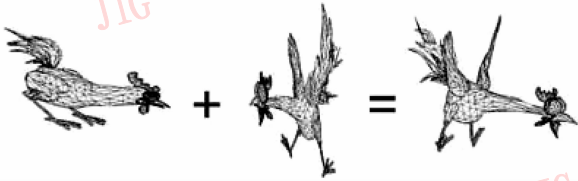


图2 公鸡运动的高低频分解

Fig.2 Decomposed motion of the chicken

全局仿射变换矩阵与变换余差:如果给定一段依时序变化的顶点组序列 V_0, V_1, \dots, V_{s-1} , 其时长为 S , 每一帧的顶点组均具有 N 个顶点, 并以齐次坐标表示, 则其中任一帧顶点组 $V_t (0 \leq t < S)$ 为 $4 \times N$ 的矩阵。选定第一帧顶点组 V_0 (或取所有帧的平均) 作为变换基准, 力求找到一个 4×4 仿射变换矩阵 A_t 作为式(1)的最小二乘解:

$$A_t V_0 = V_t \quad (1)$$

实际应用中^[8], 常采用式(2)的形式求得每一帧的仿射变换矩阵 A_t :

$$A_t = V_t V_0^T (V_0 V_0^T)^{-1} \quad (2)$$

对于所有 t , 仿射变换矩阵 A_t 包含了形变序列 V_0, V_1, \dots, V_s 的低频变换信息, 将 A_t 作用于基准帧 V_0 即可得到 V_t 的粗略逼近。而将 A_t^{-1} 作用于 V_t 所得的结果称之为变换余差(“residuals”):

$$R_t = A_t^{-1} V_t \quad (3)$$

其实, 可以这样理解: 仿射变换矩阵的逆 A_t^{-1} 将形变序列的顶点组 V_t 映射到与基准顶点组 V_0

在位置、朝向及尺寸上相一致的空间中。在此空间中相对于基准顶点组, 每一帧顶点组在局部上的变化是作仿射变换后剩余的高频形变, 而变换余差正是包含了这些信息。图2展示的高低频形变相加获得总体形变的“等式”实际上相当于进行了下式运算:

$$A_t R_t = V_t \quad (4)$$

2 植物运动的递归分解

2.1 运动的层次性

对物体的运动进一步作观察和分析, 不难得出下述推论: 从不同的尺度上理解物体的运动, 如果将全局意义下的运动细节分割到局部域下, 那么局部域下的运动又会出现相对的一致性; 而且局部域的尺度越小, 局部运动的一致性越明显。也就是说, 物体的运动蕴涵有层次性。这意味着: 如果能将物体运动按某种规则细分至尺度渐小的局部域下, 局部运动中的低频成分将逐渐占据主流地位; 将一系列区域的低频运动提取出来, 再以某种形式将低频运动组织合成, 可获得原始运动一定意义上的逼近, 实质上实现运动的简化。

对于一般物体, 运动的细分方式与仿射变换矩阵(代表低频运动)的组合形式较难掌控。而对于天然具有多分支层级结构的植物, 其运动的尺度层次与几何的尺度层次基本统一, 都是以其枝干的树型结构为参考, 那么实现植物运动的多尺度递归分解和渐进逼近是可行的。

2.2 仿射变换树

植物的外在运动主要由其枝干骨架所驱动和主导, 因此植物运动一般记录为枝干骨架的形变序列, 即由骨架结点(顶点)组序列 V_0, V_1, \dots, V_s 来表述。那么, 对于序列中的任一帧顶点组 $V_t (0 \leq t < S)$, 依据枝干的树型结构, 由根部开始往下遍历, 在各个子树所辖区域内求取仿射变换矩阵, 并利用变换余差计算以仿射变换逼近原始形变所带来的误差。由于细分至一定层级后, 子树区域内的运动已具有较强的一致性, 此时经由一次仿射变换已能很好地逼近原始形变, 则在该级子树停止细分; 否则, 深入下一级子树递归进行运动分解。

综合骨架结点组序列各帧的运动分解计算结果, 参照枝干的树型结构建立一个树型索引结

构——仿射变换树(ATH)。在图3所示的一个仿射变换树实例中,每一结点包含一个 $A^h | R^h$ 变换对,其中, A 为仿射变换矩阵, R 为变换余差, h 为子

树级别。图3(a)不同底色的椭圆代表不同子树所辖制的区域,与图3(b)仿射变换树的结点相对应,即为各个 $A | R$ 变换对所作用的范围。

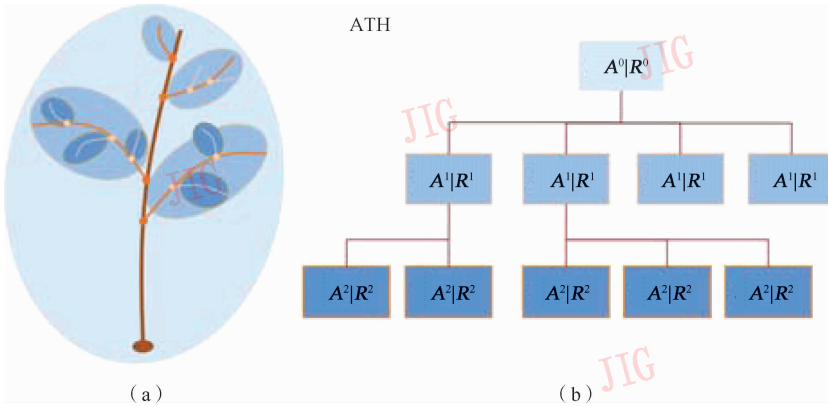


图3 一个仿射变换树实例

Fig.3 An instance of ATH

3 仿射变换树的构建

仿射变换树依照植物枝干系统的树型结构建立,因而具有相似的拓扑结构,但二者并不一定相同。因为部分子树内的运动已足够一致而不需要进一步细分,仿射变换树就不一定细化到每根枝条,它可能只是枝干结构的缩减版本。这表明仿射变换树不仅依赖植物的形态结构,还与具体的形变序列相关。仿射变换树的结构是由植物的几何特征和运动特征两方面综合决定。

建立仿射变换树从植物的枝干结构出发,递归深入到各级子树,逐步分析子树域内以仿射变换替代原始形变的合理性。该合理性由形变逼近度(TAM)来界定。如果逼近度可以接受,则在当前子树停止细分并返回;如不能接受,则此子树的运动尚不够一致,需要对其下级子树递归作分析,往下直至单根枝条。

3.1 形变逼近度

形变逼近度即是在某个子树域内作一次仿射变换所得形变接近原始形变的程度,借此判定对于形变序列中任一帧该子树以仿射变换替代原始形变的合理性。为此,需要从整体差异和局部差异两方面来描述形变逼近度。如前所述,变换余差 R_t 记载了高频形变,且和基准顶点组 V_0 处在一致的空间中,因此可利用变换余差来计算变换逼近度。为描述方

便先给出两个辅助定义。

变换逼近整体差异(GAD) 对于形变序列中的一帧,变换余差 R_t 中子树所有顶点与其基准位置的空间差异(欧氏距离)的平均值 σ 称为该子树变换逼近的整体差异(式(5))。

$$\begin{cases} \delta = \| (R_t)_{col} - (V_0)_{col} \|_1 \\ \sigma = \frac{\sum_k \delta}{K} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $()_{col}$ 为取列操作, K 为子树顶点数。

变换逼近局部差异(LAD) 对于形变序列中的一帧,设变换余差 R_t 中与其基准位置的空间差异(欧氏距离)大于 d 的子树顶点数目为 m ,则称 $\langle d, m \rangle$ 元组为该子树变换逼近的局部差异。

综合上述两项差异,子树的形变逼近度TAM表述为:

- 1) 对整个形变序列,其变换逼近的整体差异 σ 大于阈值 ε 的帧数不超过 η ;
- 2) 对形变序列的每一帧,其变换逼近局部差异 $\langle d, m \rangle$ 不超过阈值元组 $\langle \xi, \lambda \rangle$;

仿射变换树的生成质量主要由 $\varepsilon, \eta, \xi, \lambda$ 4个参数控制,对于给定的形变序列,经过少量测试调整即能获得较好结果。在形变逼近度计算分析过程中所得仿射变换矩阵和变换余差被保存起来作后续重用。

3.2 仿射变换树构建算法

定义形变逼近度之后可对仿射变换树构建算法

进行完整的表述,该算法较为简明,易于编程实现。
仿射变换树构建 ATH 算法流程如下:

```
Construct_ATH( )
{
  for Fame 0 to S - 1
  {
    Solve_AffineTransform( );
    Calculate_Residuals( );

    for Vertex 0 to K - 1
    { //calculating delta between the residual and base
      Calculate_Distance( );
    }

    Estimate_GAD_LAD( );
  }

  if ( Is_TAM_UnAcceptable( ) )
  {
    for each Sub-Tree
    { //recursively calling the function itself
      Construct_ATH( );
    }
  }
  else {
    Add_Node_to_ATH( );
    return;
  }
  return;
}
```

4 植物运动的渐进逼近

仿射变换树建立之后只是一个索引结构,它仅表征对于形变序列中的任一帧、在哪些子树中以统一的仿射变换来逼近对应的原始形变。应用于动画合成时,需要将序列各帧中的仿射变换矩阵和变换余差依次填充于其中,为每一帧创建一个仿射变换树实例,记为 A_i 。

以广度优先方式对变换树实例作不同深度的遍历可以获得不同细节层次的运动逼近。对于最粗糙的一级,仅将仿射变换 A_i^0 作用于骨架顶点组 V_0 全体,可获得整体一致的姿态变化;当运动细节需要增加时,对仿射变换树作深一层的遍历,将下一级各个 A_i^1 分别作用于 V_0 中对应子树所辖的顶点;当遍历

更深一级到达 A_i^2 时,二级子树的运动逼近方法依此类推。随着对仿射变换树遍历的逐级加深,骨架运动的逼近将逐渐变精细。

此外,当访问到叶结点时可进一步增强细节,即将该仿射变换作用与对应的变换余差叠加,获得原始形变。故此,如果仿射变换树的高度为 h ,可获得的运动细节层次级数为 $h + 1$ 。

在综合场景中,合成的植物运动的细节层次将要随视点的移动而变化,可采用“启发式”策略将观察距离和运动细节层次级别关联起来,在不同的距离下对仿射变换树作不同深度的遍历。

5 实验

为了验证提出的算法,进行了实验。实验的测试平台为一台配备 Intel Core2 2.33G CPU, 2GB 内存, NVIDIA GeForce 8600GT 图形卡的台式机。下面给出结果和分析。

以一棵具有 3 级结构的树为例作描述和分析,该株树的有限元模型的单元及结点数目平均约为 8 000,计算它在风力 $(-1, 0, 1)$ 条件下,200 个计算步的形变,结点位移数据约为 57.6 MB。经过预处理后,获得了长度为 200 的形变序列。

构建仿射变换树的过程中,主要的技巧在于调节 $\varepsilon, \eta, \xi, \lambda$ 这 4 个参数的值,以便获得一个较好的树型,同时还需顾及计算时间和存储量。表 1 给出一组典型的参数值和相应的计算结果。上述参数条件下,每一帧顶点组的仿射变换树实例的装载时间约为 3 ~ 5 ms,所耗内存空间约为 3.7 MB,压缩比高达 18:1。

表 1 一组参数设定及相应的 ATH 计算结果

Tab.1 A set of parameters and corresponding ATH

参数	$\varepsilon = 358.6$	$\eta = 15$	$\xi = 5.7$	$\lambda = 6$
ATH 深度 = 3	总结点数 = 97		叶子结点数 = 68	

然后,将一批树植入到一个综合场景中,以仿射变换树实例来合成树的运动。离视点较近时,合成一棵树的精细运动耗时约 0.3 ms,较远处合成其粗略运动的时间约为 0.05 ms。相比于以往的树木动态实时模拟,动力学预计算和层次式简化相结合的树木动画合成方法在生成效率和运动真实感都明显占优。图 4 展示了大型森林场景的画面效果。



图4 大规模森林场景中的真实感树木动画

Fig.4 Realistic animation of a large-scale forest

6 结论

利用精细的形变序列数据高效生成真实感植物动画需要考虑动态几何简化和运动细节层次问题。基于视觉感知规律,利用植物枝干的天然层级结构,将枝干中各级子树的运动进行高低频分解,“低频运动”表征子树区域的主体变换,以仿射变换矩阵表示,“高频运动”代表运动细节。将各级子树的“高低频运动”组织为仿射变换树,以广度优先模式进行遍历该结构,将“低频运动”进行动态合成,实现原始运动的渐进逼近,很好地解决了上述问题。实验表明算法能实现植物运动的高效简化和压缩,可应用于室外场景中大规模植物真实感动画的生成。

参考文献 (References)

[1] Feng Jinhui, Chen Yanyun, Yan Tao, et al. Going with wind-physically based animation of trees [J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21 (9): 767-773. [冯金辉, 陈彦云, 严涛, 等. 树在风中的摇曳——基于动力学的计算机动画 [J]. 计算机学报, 1998, 21 (9): 767-773.]

- [2] Hu Xiaoyi, Li Huafeng, Guo Yimu, et al. Dynamic finite element based animation of tree swing in the wind [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19 (9): 1166-1171. [胡潇毅, 李华锋, 郭乙木, 等. 基于动力学有限元的树在风中摇曳动画 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19 (9): 1166-1171.]
- [3] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 1997. New York, NY, USA: ACM, 1997: 209-216.
- [4] Hoppe H. Progressive meshes [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996. New York, NY, USA: ACM, 1996: 99-108.
- [5] Mohr A, Gleicher M. Deformation Sensitive Decimation [R]. Madison, WI, USA: University of Wisconsin, 2003.
- [6] Kircher S, Garland M. Progressive multiresolution meshes for deforming surfaces [C] // Proceedings of ACM/Eurographics Symposium on Computer Animation 2005. New York, NY, USA: ACM, 2005: 191-200.
- [7] Lengyel J E. Compression of time-dependent geometry [C] // Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics. New York, NY, USA: ACM, 1999: 89-95.
- [8] Shamir A, Pascucci V. Temporal and spatial level of details for dynamic meshes [C] // Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York, NY, USA: ACM, 2001: 77-84.