

真实感植物绒毛建模和实时绘制^{*}

陆声链^{1,2} 赵春江² 郭新宇² 李长锋²

(上海交通大学数字农业实验室 上海 200030)¹ (国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100097)²

摘要 提出了一种植物绒毛建模方法,通过定义一组参数来控制植物造型表面生成各种形态的绒毛。该方法利用 Poisson-disk 分布模式确定器官曲面上绒毛的分布,并根据网格曲面的面积确定绒毛的密度,避免了在不规则曲面网格模型上生成不均匀的绒毛。绒毛的实体可用曲线或圆柱体表示,绒毛的长度、半径、卷曲度、方向和密度等参数都考虑了植物器官的位置信息。该方法对植株规模的模型达到了实时的处理要求,能够有效地生成各种具有真实感的植物表面绒毛效果。

关键词 绒毛,三维植物建模,实时绘制,真实感建模

Realistic Modeling and Real-time Rendering of Plant Hairs

LU Sheng-lian^{1,2} ZHAO Chun-jiang² GUO Xin-yu² LI Cheng-feng²

(Laboratory of Digital Agriculture, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)¹

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)²

Abstract A method was presented to improving the appearance of computer generated plants is presented in this paper, by including hairs that cover many plant organs. This method employs Poisson-disk pattern to assign the distribution of hairs on the surface of each organ, while the density of hairs is adjusted based on the area of organ surface, and avoid generating irregular pattern of hairs on irregular surface. Individual hairs are then mapped onto the organ surfaces according to the generated attachment point. Hair properties including length, radius, direction and density are specified and adjusted according to positional information of the organ surface, and the geometry of individual hair can be represented as curve or cylinder. This allows generating a wide range of hairs styles. Sample results show that the proposed method can render realistic hairs in real-time, and can represent various styles of hairy plant effectively.

Keywords Hairs, 3D plant modeling, Real-time rendering, Realistic modeling

1 引言

大部分植物的茎、叶子、幼枝、果实和花瓣等器官上覆盖着一层绒毛。植物绒毛的形态随物种、器官不同而不同,即便在同一棵植株上,不同枝条或节位上同种器官的绒毛也可能有极大的差别。绒毛在植物器官表面的分布是一个有趣的问题,最近有学者从分子的角度进行了研究^[1],也引起了计算机图形学研究者的注意^[2]。

在计算机图形学中,毛状体的建模和绘制是一个重要的研究课题,这部分工作主要集中在两个方面:人的头发和动物的体毛。毛发和体毛建模的一个重要方面是根据毛发在物体表面的着生位置对毛发的特征进行调整。Kajiya 等^[3]提出了一种基于纹理的体毛绘制方法,他们利用三维参数数组储存描述体毛的外观属性;Goldman^[4]则使用一种统计方法绘制某个距离外的体毛;Miller^[5]根据网格的纹理坐标安排单个毛发的方向;Gelder 和 Wilhelms^[6]认识到需要根据动物不同身段的朝向确定动物体毛的属性,他们采用方向矢量生成动物的肢、臂、脚等各种部位的体毛,但他们的的方法难以描述头部和胸部区域的绒毛的方向;Lengyel 等^[7]通过放置在网格表面上的矢量场确定毛发的方向,并为用户提供了交互式的毛发

样式调整界面;Fleisher 等^[8]则采用多孔粒子理论解决分布在不同拓扑结构的表面上的毛发的放置和朝向问题,并演示了利用这种方法生成各种鳞和刺覆盖的曲面的效果;张晓鹏等^[9]采用弯曲纹元和三维纹理体技术生成各种头发造型;杨刚等^[10]则利用多层纹理表达方法表示毛发,并用图形处理器(GPU)进行实时绘制,最近,他们还提出了一种非均匀纹理层的真实感短毛实时绘制方法^[11],通过混合绘制多层次半透明纹理层来表示物体表面的毛发效果,并根据视点位置以及物体表面各部位毛发形态的不同自适应地采用不同的层数来表示物体各部位的毛发,能够有效地表现物体表面的局部性长毛或倒伏毛发等各式毛发形态。

基于纹理的方法和统计方法,在保持物体的几何造型简单的情况下合成具有毛皮覆盖效果的图像,但这些方法难以对单根绒毛进行控制。最直观的方法是用几何元素表示每根毛,这样的毛发模型提供了更多的交互操作^[12],甚至基于物理的控制^[13]。为了提高性能,可以将单个毛发组成缕或束并以此作为控制单位^[14-15]。

以上的研究都是针对人和动物的毛发,Fowler 等^[16]首先进行了植物表面绒毛可视化生成的研究,他们利用叶序模式确定仙人掌和山羊胡菊花托上的毛刺的位置和方向,生成的

^{*} 国家高技术研究发展计划项目(2007AA10Z224),北京市自然科学基金项目(4062015),国家十一五科技支撑计划(2006BAD10A07)。
陆声链 博士研究生,研究方向为计算机图形学、虚拟现实;赵春江 研究员,博士生导师,主要研究领域为农业信息技术;郭新宇 副研究员,研究方向为作物数字化设计。

植物毛刺具有较高的视觉效果。最近, Fuhrer 等^[2]提出了一种生成植物表面细微绒毛的方法, 他们利用植物器官表面的位置信息确定绒毛的密度、长度等属性, 能够生成各种逼真的带绒毛的植物造型; 但在他们的方法中, 绒毛的分布依赖于器官表面网格的划分, 如果网格曲面划分不规则, 用这种方法生成的绒毛分布难以控制, 甚至会发生错乱。

与人的毛发和动物的体毛相比, 植物表面绒毛的形态结构更加复杂, 植物绒毛的特征可能会随植物器官的位置和生长阶段不同而变化, 例如, 嫩叶上的绒毛的密度往往更大, 而当叶片变老时, 叶片背面和正面上的绒毛可能会脱落, 但边缘上的绒毛保持不变。绒毛的方向也会随器官表面的位置不同而不同, 此外, 植物绒毛个体的形状各异, 即便在同一小块表面上, 也会同时存在曲直不同、长短不一的绒毛, 正是由于植物的这些特点, 使得基于纹理的方法难以生成逼真的植物表面绒毛形态。

考虑到以上情况, 本文认为植物表面绒毛个体需要用几何元素表示。具体而言, 本文所提出的方法中, 绒毛实体可用曲线或圆锥体表示, 同时通过一组参数来控制植物造型表面生成各种效果的绒毛样式, 这种方法根据表面网格的面积确定绒毛的密度, 避免了在不规则曲面网格模型上生成不均匀的绒毛, 同时, 绒毛的长度、半径、卷曲度、方向和密度等参数都考虑了植物器官的位置信息。

2 植物造型表面绒毛生成

植物几何造型的表面一般由多边形网格构成, 最常用的多边形是三角形和四边形。本文中, 植物器官的表面都用三角形网格表示。绒毛生成过程包括以下几个步骤: 首先确定绒毛在各个器官表面的分布, 也就是绒毛在器官表面的着生点, 然后确定单根绒毛的几何表示, 最后将绒毛放置到事先计算好的着生点位置上, 并调整每条绒毛的大小、卷曲度和方向。

2.1 绒毛分布的生成

生物学研究表明, 毛状体在植物叶片上的分布程一种半均匀模式, 单个绒毛之间保持一个最小距离, 满足扩散反应模式^[1]。Fuhrer 等^[2]利用 Poisson-disk 采样的思想来生成近似于这种分布模式的绒毛, 他们先预先生成一个足够大的正方形的 Poisson-disk 分布模式, 在绒毛生成过程中将这个分布模式按某种比例映射到器官网格曲面上, 作为绒毛的着生点信息, 他们假定器官曲面都是规则的, 能够划分为规则的平行四边形。我们也采用 Poisson-disk 采样的思想产生绒毛的分布, 与 Fuhrer 等的方法不同的是, 我们不假定器官的几何曲面网格是规则的, 如很多植物叶片的形状极不规则, 很难用规则的网格曲面进行准确表示。

Poisson-disk 采样要求每个采样点到其余任一采样点的距离都大于一个阈值。Poisson-disk 分布模式在实际应用中一般采取两种方式: 实时生成方式和纹理映射方式。前者在需要产生 Poisson-disk 分布的面元上实时计算抽样点, 其生成方法一般是不断地在指定区域随机提取一个采样点, 然后和已有的采样点集合比较距离, 若遇到小于阈值的就取消这个采样点, 再重新随机获取一个采样点, 如果符合条件则添加到采样点集合里, 重复这个过程直到生成的采样点达到预定的数目。这种生成方法的优点是直观、实现简单, 但如果面元区域非常大, 或者采样点数目巨大, 那么计算所有的采样点需要很大的开销, 难以满足实时交互的需要, 因此, 很多应用里,

都采用纹理映射方式。这种方法预先生成一个足够大的 Poisson-disk 分布模式, 使用时, 再将这个分布模式根据面元的大小按一定的比例缩放后映射到面元上, 这种预先计算好的 Poisson-disk 分布模式一般是一个正方形的区域, 如图 1 左边的图所示。由于我们假定植物器官模型的曲面网格由三角形组成, 因此映射时不能将正方形的分布模式直接映射到器官的曲面上, 为此, 在实际应用中, 对每个需要产生绒毛的面元, 首先将面元投影到预先计算好的分布模式上, 然后根据用户定义的比例因子进行缩放, 再将缩放后的三角形覆盖区域的抽样点信息映射到器官曲面的目标三角形上, 即可获得器官曲面网格上每个三角形的绒毛密度和每根绒毛的着生点位置。图 1 演示了这种方法的工作原理, 其中右边的图表示一段枝条的网格化圆柱体, 虚线表示的三角形为圆柱体曲面上一个三角形在预先计算好的 Poisson-disk 分布模式上的投影。

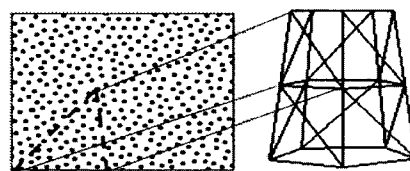


图 1 利用纹理映射方式应用 Poisson-disk 分布的工作原理

考虑到植物几何模型中曲面面元的面积一般都不大, 每个面元上一般只用几根或十几根绒毛即可获得较好的视觉效果; 在每个面元上实时生成 Poisson-disk 分布模式所需要的计算时间很少, 能够满足实时交互的需要。因此本文的方法中也提供了实时生成 Poisson-disk 分布模式的方法。

实际上, 植物器官的绒毛密度除了与物种、品种有关外, 还和器官的着生位置与生长阶段相关; 因此, 在生成器官曲面面元的绒毛密度时需要考虑这些因素, 2.3 节将专门讨论这个问题。

2.2 绒毛的几何表示和放置

可用的绒毛几何表示方法有多种, 包括曲线、线段、圆柱体、三角形面片等。本研究中, 使用了线段和圆柱体两种表示方法, 每根绒毛以一系列顶点的形式存储, 这些顶点作为 B 样条曲线的控制点, 在绒毛的生成和交互调整形态的过程中生成一根样条曲线, 在样条曲线的基础上可以生成线段或圆柱体。缺省情况下, 绒毛都用线段表示, 每段线段都可以指定大小, 即具有不同的半径。用圆柱体表示单根绒毛虽然能够提供更高的真实感, 但却需要生成大量的曲面网格, 在交互式设计时影响性能。而且植物的绒毛一般很细, 实验结果表明, 用线段表示单个绒毛已经能够获得具有较高真实感的结果。每根绒毛用多少段线段表示取决于绒毛的弯曲程度, 越弯曲需要的线段数越多。此外, 由于植物表面上绒毛的形状和大小都不同, 因此很难逐根地调整绒毛的形态。一个解决方法是事先制作好几个不同形态的绒毛个体, 作为模板文件, 在器官表面的上放置绒毛时随机选择某个绒毛模板即可。图 2 给出了几个绒毛模板。在实验中也发现, 用 4、5 根绒毛模板即可获得较好的视觉效果。

确定绒毛的几何表示之后, 还需要根据上一步计算获得的绒毛分布信息, 将绒毛放置到植物器官的曲面上。放置时主要的问题在于确定绒毛相对于所着生的器官曲面的方向。一般情况下是按垂直方向将绒毛曲线放置到器官曲面上, 即绒毛的方向向量与曲面面元的法向量相同。在本文的算法中, 绒毛的方向向量取绒毛线段的第一段。而对于曲面边界

上的绒毛需要特别处理,植物器官边界上的绒毛一般都与器官曲面平行,如叶片边缘的绒毛,因此,器官边缘上的绒毛的方向可通过绒毛所在的曲面元边缘线的方向向量与该面元的法向量的叉乘获得。



图2 绒毛模板

在绒毛放置过程中,绒毛的方向向量可以根据需要进行修改,如加入一定的随机角度,此外某些植物器官的正面和背面都可能长有绒毛,如叶子和花瓣,这也需要在绒毛生成过程中考虑。下一小节将详细讨论这些问题。

3 参数控制

上文已经提到,植物器官表面的绒毛形态万千,各个绒毛的形状和大小都不相同,要在交互式过程中逐个调整绒毛的形态是不可能的;因此,我们定义了一组参数,并通过函数调用的形式实现对绒毛的长度、半径、卷曲等属性的控制。表1列出了主要的函数及相应的参数。

表1 绒毛属性设置函数和参数设置

函数名	功能	功能
SetBirdMode (enum)		设置绒毛生长模式:正面、背面、双面或无
SetEdgeMode (bool)		设置边界绒毛模式:有或无
SetDist (bool)		设置绒毛分布生成模拟:预计算或即时模式
SetDensity (pvalue, {loca, stag, rand})		设置绒毛密度
SetLength (pvalue, {loca, stag, rand})		设置绒毛长度
SetRadius (pvalue, {loca, stag, rand})		设置绒毛半径
SetDirect (dx, dy, dz, {loca, stag, rand})		设置绒毛方向
SetCurl (pvalue, {loca, stag, rand})		设置绒毛卷曲度



图3 随表面位置不同而密度、方向、长度不同的绒毛效果

表1中前两个函数用来指定器官表面绒毛的生长模式,即绒毛依附于器官的正面还是背面,或者两面都有,或无绒毛,以及绒毛是否在器官曲面边界着生。后几个函数都包括三个可选的参数,其中 *loca* 为相对位置参数,其值在 $[0, 1]$ 之间;参数 *stag* 表明器官的生长阶段,当前的实现中暂时没有考虑它;*rand* 是一个随机数,目的是增加随机效果,使得参数 *value* 的最终值介于 $value \pm rand$ 之间。图3给出了一个应用本文的方法在一段圆柱体表面生成绒毛的效果,其中绒毛密度和长度随圆柱体 *z* 坐标的增大而逐渐减少,而绒毛的倾斜角度则逐渐增大,同时,绒毛的长度有一定的随机性,在局部区域形成参差不齐的效果。

3.1 密度

2.1节详细描述了本文采用的两种绒毛分布生成方法,函数 *SetDist* 用于指定生成绒毛分布时使用哪种方式,函数 *SetDensity* 则用来设定绒毛的密度,是以曲面面元为单位设置的。

若绒毛分布使用基于预计算的映射方式,则参数 *pvalue* 为控制密度的比例因子。由于在映射时所有的面元都使用同一个比例因子,因此每个面元的绒毛密度与它的面积成正比,这样,即便器官曲面网格划分不规则,在整个器官表面上仍然可以获得符合 Poisson-disk 分布模式的绒毛形态。

若使用即时方式生成 Poisson-disk 分布模式,参数 *pvalue* 用来控制网格曲面上每个面元的绒毛数量。默认情况下,同样大小的面元上的绒毛数量相同。由于植物器官的形态结构极不规则,因此器官的曲面网格也可能由不规则的多边形构成,比如包括多个裂片的叶片,为了使曲面面元上的绒毛数量不依赖于曲面的划分(即不假定器官曲面是均匀划分的),我们将每个面元上的绒毛数量定义为与面元面积成正比的函数。

$$N_p = pvalue * Area_p * \beta * loca \pm rand \quad (1)$$

其中 N_p 为面元 *p* 上最终需要生成的绒毛数量, $Area_p$ 为面元 *p* 的面积; β 是控制因子,用来调整面积的影响;*loca* 是面元的位置信息;*rand* 则为随机量。参数 *loca* 和 *rand* 都是可选的,缺省情况下分别为 1 和 0。

3.2 方向

将绒毛放置到曲面面元表面时,需要指定绒毛与面元的方向,默认情况下是垂直方向。但实际上绒毛并不总是垂直于器官表面,而是具有不确定的方向,因此提供 *SetDirect* 函数用于设置绒毛的方向,其中参数 *dx*、*dy* 和 *dz* 分别用于指定绒毛的方向向量在曲面面元局部坐标系下相对于 *x*、*y* 和 *z* 轴的旋转角度,其他三个参数的作用与上面的函数相似。

3.3 长度和半径

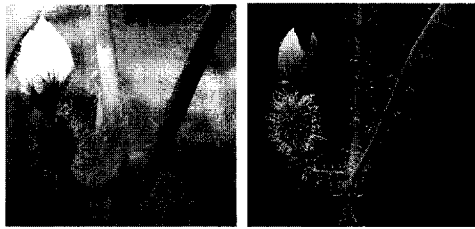
绒毛的相对长度和半径分别通过 *SetLength* 和 *SetRadius* 函数调整,与方向和密度的调整一样,绒毛长度和半径也可以与位置相关联。绒毛长度长短不一的随机效果除了可以通过参数 *rand* 获得外,也可以通过不同的绒毛模板生成。对于绒毛半径,有两种方式,一种是整个绒毛使用同样的半径,另一种是递减的半径,即生成圆锥体的绒毛,以表示毛刺这样形态的毛状体。

4 实验结果和分析

采用 C++ 语言和 OpenGL 图形渲染引擎在普通的 PC 机上实现了上文描述的绒毛生成方法,并开发了交互式的植物绒毛生成系统。为了演示该方法的有效性,我们模拟了多种不同形态的植物绒毛。其中植株的各种器官,包括茎、叶子、果实、花等的几何曲面均利用参数化建模方式生成,并通过一个树形数据结构组合成植株结构。所有的绒毛都是通过交互的方式实时生成,在我们进行的实验里,在植株规模尺度上绒毛的生成能够达到实时交互的要求。下面将给出利用该系统生成的几种植物表面绒毛效果。

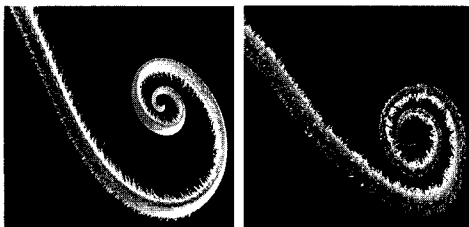
西瓜植株的茎蔓、嫩叶、果实、花梗和花瓣等器官上都覆盖着一层白色的绒毛,其中叶片和果实上的绒毛在生长的初期比较明显,绒毛密且长,随着器官的生长,绒毛逐渐脱落。图4(a)是拍摄的一段西瓜茎蔓和果实的照片,而(b)则是利用本文的绒毛生成方法生成的一段西瓜植株三维造型,其中茎秆、瓜柄、花梗都由三角化的圆柱体表示,花瓣和花萼用

参数化三角形网格曲面生成。为增强真实感,花瓣上使用了纹理映射。在生成绒毛的过程中,使用了3个不同弯曲程度的绒毛模板,并通过一定的随机旋转角度获得随机绒毛朝向效果。图5则给出了一个带绒毛的植物卷须的真实照片和模拟的造型。从图5(a)可以看出,真实照片上绒毛的密度和长度并不均匀,卷须卷曲面的密度和长度比其他面上的要大些,而卷须末端则不带绒毛。为此,在生成这种绒毛形态效果时,我们通过两个位置信息进行控制,一个是沿卷须主轴方向的纵向方向的位置信息,一个绕卷须主轴垂直旋转方向的横向位置信息。具体实现时,卷曲根部的纵向位置值比末端的位置值大,卷须卷曲面上的横向位置值设置得比其他面的横向位置值大,从而生成图5(b)的效果。图6是几个西红柿果实造型,西红柿的茎杆和果实的柄上着生一层半径均匀的绒毛,我们模拟的西红柿造型能够较真实地生成这种效果。



(a) 真实照片 (b) 生成的效果

图4 拍摄的和生成的西瓜茎蔓、果实表面绒毛



(a) 真实照片 (b) 生成的效果

图5 拍摄的和生成的植物卷须表面绒毛



(a) 真实照片 (b) 生成的效果

图6 拍摄的和生成的西红柿器官表面绒毛

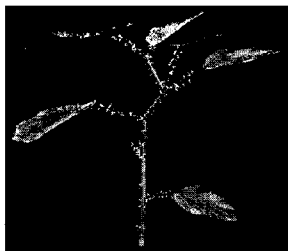


图7 牛茄子植株绒毛效果

某些植物不同器官上的毛状体的形态可能差别很大,牛茄子就是一个例子。某些牛茄子品种的叶片上覆盖一层细小的绒毛,嫩叶上的绒毛比老叶的更密更长;而叶柄和茎杆上则附着尖长的刺。图7是利用我们开发的系统生成的一个牛茄子植株三维造型,其中叶片上使用了纹理图片。图中不同部位的叶片上的绒毛使用了不同的参数进行调整,其中顶部的绒毛

更长更密,颜色偏白,而底部叶片上的绒毛较疏较短,边缘带绒毛;茎杆上的毛刺用圆柱体表示,长度加入了一定的随机量。

结束语 绒毛是一个重要的植物形态特征,准确模拟绒毛形态对植物模型的真实感效果有着重要的作用,同时在植物品种识别、图像合成等方面也有着积极的意义。本文的研究表明,各种绒毛形态能够通过一种参数化的方法生成,并很容易与现有的三维植物建模方法结合。这种方法充分考虑了植物器官绒毛形态的特殊性,利用植物器官曲面的位置信息作为生成绒毛形态的影响参数,同时通过加入一定的随机变量获得自然的效果。当然,本文的工作还有不少需要完善的地方,比如没有进行绒毛的碰撞检测,因为如果绒毛的弯曲度很大,在绒毛放置过程中有可能与器官表面发生碰撞,产生穿透现象,目前本文的方法中还没有处理这个问题。

随着植物建模方法研究的不断输入,必将需要更好的方法对植物形态进行更细致的描述,以支持图形学、农业、游戏等各领域在研究和应用上的需求。本工作的主要目的是生成逼真的植物表面绒毛效果,实验结果也表明文中提出的方法能够产生各种具有较高真实感的绒毛形态。更进一步地,本文的研究对相关研究的深入也有一定的启发意义,如利用或借鉴成熟的毛发建模方法提高植物绒毛的生成和绘制速度、基于植物生理知识实现绒毛生长过程的可视化模拟等。

参考文献

- [1] Leyser O, Day S. Mechanisms in plant development. Oxford. Blackwell, 2003
- [2] Fuhrer M, Jensen H W, Prusinkiewicz P. Modeling Hairy Plants//Proceedings of Pacific Graphics. 2004; 217-226
- [3] Kajiya J T, Kay T L. Rendering fur with three dimensional textures//Proceedings of SIGGRAPH. 1989; 271-280
- [4] Goldman D. Fake fur rendering//Proceedings of SIGGRAPH. 1997; 127-134
- [5] Miller G. From wire - frame to furry animals // Proceedings of Graphics Interface. 1988; 138-146
- [6] Gelder A V, Wilhelms J. An interactive fur modeling technique//Proceedings of Graphics Interface. 1997; 181-188
- [7] Lengyel J, Praun E, Finkelstein A, et al. Real-time fur over arbitrary surfaces//Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. 2001; 227-232
- [8] Fleischer K W, Laidlaw D H, Currin B L, et al. Cellular texture generation//Proceedings of SIGGRAPH. 1995; 239-248
- [9] 张晓鹏, 吴恩华. 毛发的结构造型方法. 软件学报, 1999, 10(9): 897-903
- [10] 杨刚, 孙汉秋, 王文成, 等. 基于 GPU 真实感毛发绘制. 软件学报, 2006, 17(3): 577-586
- [11] 杨刚, 孙汉秋, 王文成, 等. 采用非均匀纹理层的短毛实时绘制. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(4): 430-435
- [12] Daldegan A, Thalmann N, Kurihara T, et al. An integrated system for modeling, animating and rendering hair. Computer Graphics Forum, 1993; 211-221
- [13] Anjyo K, Usami Y, Kurihara T. A simple method for extracting the natural beauty of hair// Proceedings of SIGGRAPH. 1992; 111-120
- [14] Kim T Y, Neumann U. Interactive multiresolution hair modeling and editing//Proceedings of SIGGRAPH. 2002; 620-629
- [15] Yang X D, Xu Z, Wang T, et al. The cluster hair model. Graphical Models, 2000, 62(2): 85-103
- [16] Fowler D R, Prusinkiewicz P, Battjes J. A collision-based model of spiral phyllotaxis// Proceedings of SIGGRAPH. 1992; 361-368