

# 基于层状纹理切片表示法的短毛造型系统

杨刚<sup>1),2)</sup> 曹卫群<sup>1)</sup> 黄心渊<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(北京林业大学信息学院,北京 100083) <sup>2)</sup>(中国科学院软件研究所计算机科学重点实验室,北京 100080)

**摘要** 提出了一个真实感短毛的实时绘制与造型系统。该系统采用快速的层状纹理切片技术进行毛发表示,保证了真实感短毛绘制和造型的实时性。在毛发造型方面,系统采用倒伏向量场和长度标量场来控制模型表面短毛的形态变化,并提供了多种造型工具,如梳理、吹风、引力棒、插值、扰动等。利用这些造型工具,用户可以灵活、直观地对短毛形态进行编辑与设计。系统还提供了一个毛发纹理生成器,使用户可以通过设计毛发纹理来对毛发的粗细、疏密和颜色等属性进行整体控制。实验结果表明,本文系统具有较强的短毛造型能力,并具有非常好的可操作性和用户交互性。

**关键词** 毛发造型 毛发绘制 层状纹理切片 表面场

中图法分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)05-0984-07

## A Fur Modeling System Based on Multi-layer Textured Slices

YANG Gang<sup>1),2)</sup>, CAO Wei-qun<sup>1)</sup>, HUANG Xin-yuan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

<sup>2)</sup>(Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** This paper presents a system for real-time modeling and rendering short fur. In the system, multi-layer textured slices are employed to represent furry surfaces, and the high rendering performance is achieved. The system utilizes a vector field as well as a scalar field to control the shape variations of furry surfaces, and provides several fur modeling tools, including the comb, the blower, the attractive-stick, and the tools for interpolating, smoothing and disturbing fur, by which users can model fur shape conveniently. In addition, a fur texture creator is provided for designing various fur textures that can affect the final rendering results of furry surfaces. The experimental results show that the system has good modeling capability and is easy to use.

**Keywords** fur modeling, fur rendering, multi-layer textured slices, surface fields

## 1 引言

毛发的绘制和造型一直以来都是图形学研究中的难点和热点问题。至今研究者们已经提出过若干毛发造型与绘制系统<sup>[1,2]</sup>。但是这些系统主要针对于长发的建模与表示,无法有效表现短毛的效果。一些商业3维建模软件提供了针对短毛的造型工具,如 Maya fur, shag fur, ornatix 等。这些工具都采用了基

于几何的毛发表示方法。由于毛发的几何数量巨大,使得采用几何方法表示毛发难以达到实时的真实感绘制速度。因而,使用这些工具进行毛发编辑时的一个共同特点是:交互式编辑操作与真实感绘制过程分离。即在编辑毛发形态时,为了达到交互的响应速度,只采用稀疏的“关键毛”来代表毛发,而且只进行简单的绘制计算;只有当毛发编辑完成后,才绘制所有的毛发,并使用更复杂的绘制计算来产生真实感效果。这使得用户在编辑毛发时所看到的只是毛发的

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA10Z232);国家自然科学基金项目(60703006);国家科技支撑计划项目(2006BAD10A03)

**收稿日期:**2007-11-16; **改回日期:**2008-01-16

**第一作者简介:**杨刚(1977~),男,讲师,2006年于中国科学院软件所获得工学博士学位。主要研究方向为计算机图形学。发表论文10多篇。E-mail: yanggang@bjfu.edu.cn

示意性表示,无法达到真正的“所见即所得”。本文的目标则是构建一个实时的短毛造型与绘制系统,能够让用户在编辑毛发时“所见即所得”。

为了取得实时的绘制速度,本文系统没有采用传统的基于几何的毛发表示法<sup>[3,4]</sup>,而是采用了基于层状纹理切片的表示技术。层状纹理切片技术最初由 Meyer 等人在 1998 年提出用来表达草地、树木等复杂物体<sup>[5]</sup>。后来 Lengyel 等人利用这种技术实现了毛发的实时绘制<sup>[6,7]</sup>。Yang 人等针对 Lengyel 方法中毛发表示的特点,提出了毛发自阴影的模拟方法<sup>[8]</sup>,增强了毛发绘制的真实感。进一步, Yang 等人在 Lengyel 方法的基础上进行了改进,提出了基于非均匀纹理层的毛发表示技术,提高了毛发表示的效率和灵活性<sup>[9]</sup>。本文系统即基于文献[9]中的非均匀纹理层表示方法进行构建,实现毛发的实时绘制与造型。

针对本文方法中毛发分层表示的特点,本文的造型系统采用了“基于表面场”的毛发形态控制方法。该方法通过模型表面的一个向量场来控制毛发的倒伏,通过标量场来控制毛发的长度,用户只要对表面场进行各种控制与修改,就可以达到毛发造型的目的。系统定义了多种用于修改表面场的操作,如梳理、风吹、引力棒、插值、平滑、扰动等。通过这些直观的控制手段,用户可以对毛发形态进行方便灵活的修改,满足毛发造型的要求。系统还提供了一个毛发纹理生成器,用户可以利用此生成器设计不同效果的层状毛发纹理,从而对毛发的粗细、疏密和颜色等属性进行整体控制。

## 2 基于层状纹理切片的毛发表示法

Lengyel 等人将层状纹理切片技术应用用于真实感短毛的表示<sup>[6,7]</sup>。他们将物体的毛绒表面用一系列同心的,半透明纹理层来表示。Lengyel 方法的主要步骤如图 1 所示:在预处理阶段,采用粒子系统生成一片几何毛发(图 1(a)),然后对这片毛发进行水平方向的采样生成多层的半透明 2 维纹理(称为 shell 纹理,如图 1(b))。在绘制阶段, Lengyel 方法生成多层网格面,每层网格面映射相应层次的 shell 纹理,对这些网格面按照由内向外的顺序进行 alpha 混合绘制就产生了毛茸茸的效果。绘制过程中,多层网格面是通过将原模型顶点沿法向或一定轨迹进行偏移而形成的(图 1(c))。

Yang 等人也采用了这种多层网格面的方法来

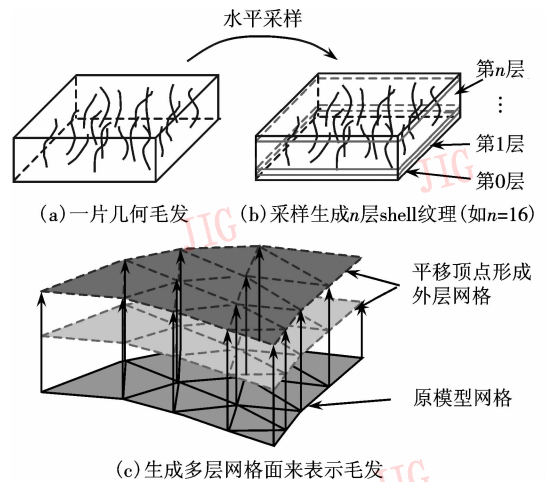


图1 Lengyel 方法示意图

Fig. 1 Fur representation in Lengyel's method

表示短毛<sup>[9]</sup>。但是与文献[7]不同,文献[9]根据物体表面的毛发分布特点,采用了“非均匀层数”的表示方式。在绘制过程中,该方法自适应地根据视点位置以及物体表面各部分毛发的形态特点而调节采用最合适的层数来表示毛发。相比于 Lengyel“均匀层数”的方式,这种“非均匀层数”方法可以在不降低绘制质量的情况下尽量减少绘制的面片数,起到加速的作用。并且这种动态调节层数的方式具有更好的灵活性与更强的毛发表达能力,这对于毛发造型尤为有利。本文系统中的毛发表达及绘制即采用了这种非均匀纹理层的方法。为了进一步提高毛发绘制的真实感, Yang 等人针对层状纹理切片方法中毛发分层表示的特点提出“层状阴影图技术”实现了毛发自阴影的模拟<sup>[8]</sup>。采用这种方法大大增强了绘制效果,但是也在一定程度上降低了绘制效率。为此,在本文系统中这种带有自阴影效果的毛发绘制主要用在造型完成之后的最终效果绘制中。

## 3 毛发造型系统概述

图 2 给出了本文系统的总体框架。在系统中,调用“毛发纹理生成器”会生成一块样本毛发并采样产生多层的毛发纹理。利用这些毛发纹理,“实时毛发绘制”模块就可以生成模型表面的短毛效果。在造型方面,用户可以使用梳理、风吹等多种造型手段对毛发的倒伏和长度进行修改。用户的修改效果通过“实时毛发绘制”这一模块实时呈现给用户,用户根据效果再进行修改。“实时毛发绘制”模块正是采用了文

献[9]中的毛发表示和绘制方法。“实时毛发绘制”模块不考虑毛发自阴影效果的模拟。只有当造型完成,或者用户想观看当前的最好效果时,才采用“详细毛发绘制”模块进行绘制,该模块在绘制过程中利用文献[8]中的“层状阴影图技术”实现了毛发自阴影模拟,可以生成更为逼真的绘制效果。

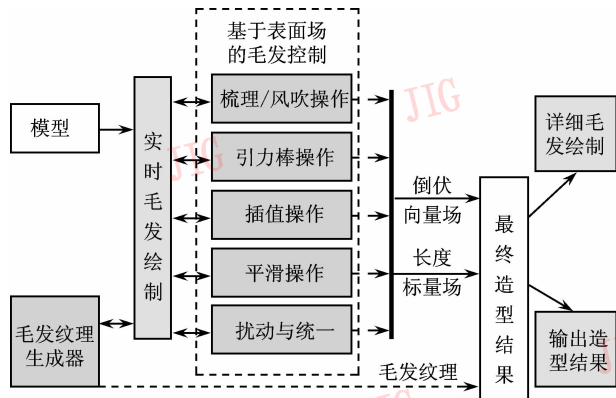


图 2 毛发造型系统框架图

Fig. 2 Framework of fur modeling system

图中深灰色的模块是可以对毛发形态产生影响的模块。其中“毛发纹理生成器”通过控制样本毛发的疏密、粗细、颜色、弯曲度等来影响毛发效果,而剩下的造型模块都是采用“基于表面场”的方式来修改毛发形态。

## 4 毛发纹理生成器

“毛发纹理生成器”作用于毛发绘制的预处理阶段,它的目的是产生多层毛发纹理,以用于毛发的实时绘制。“毛发纹理生成器”首先采用粒子系统的方法在一块正方形区域上方生成一片样本毛发体,然后沿着此正方形的法线方向对这块毛发体进行分段绘制以产生多层毛发纹理。如图 3 所示,采样毛发生成了 16 层毛发纹理,图 3(b) 只显示了其中的 4 层。每层毛发纹理都含有 RGBA 4 个分量。

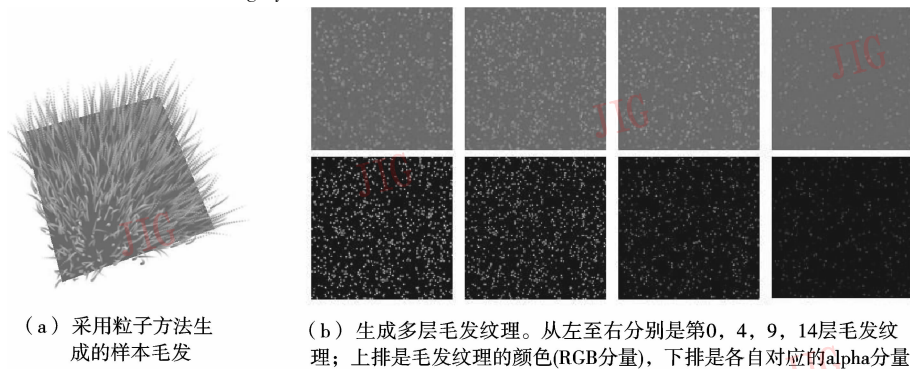


图 3 采样样本毛发生成多层毛发纹理

Fig. 3 Generating fur textures from a patch of sample fur

在样本毛发中,每根毛发都由一串排列成曲线的粒子组成;这些粒子采用图形硬件的 point sprite 功能进行绘制。本文设定每个粒子的不透明度都从中央向边缘逐渐变小,从而达到了很好的反混淆效果;粒子的不透明度就记录在毛发纹理的 alpha 通道中。“毛发纹理生成器”提供了许多参数来控制样本毛发的生成效果,如毛发的数量、毛发的弯曲程度、毛发的粗细、毛根和毛尖的颜色等等。通过这些参数,用户可以调节毛发纹理的生成效果,从而影响毛发的最终绘制效果。

在生成样本毛发后,就可以对样本毛发进行分段绘制来产生多层毛发纹理。样本毛发是生长在一块正方形区域上的,沿着正方形的法向,对样本毛发

进行正投影绘制;通过设置远近两个裁剪平面就可以实现毛发不同高度部分的绘制,从而生成多层毛发纹理。

## 5 毛发的造型

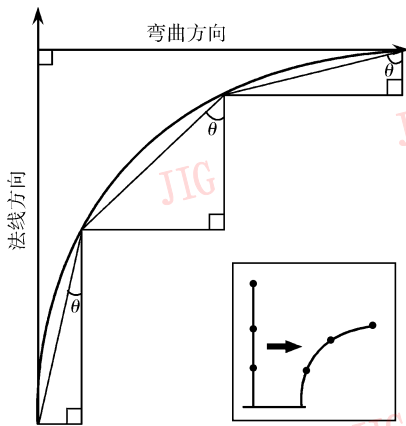
在本文系统中,毛发是通过多层网格面来表示的,这种方式使物体表面的毛发成为一个连续的整体,无法区分出一根根的毛发。在这种情况下,毛发形态的改变主要通过改变多层网格面的形状来实现。当生成多层网格面时,通过控制各个顶点的偏移轨迹就可以影响生成的网格面形状,其中顶点的偏移步长决定了毛发的长度,而偏移的方向与程度则决定了毛

发倒伏的情况。根据这个特点,本文采用了“基于表面场”的毛发控制方法。系统通过模型表面的一个向量场和标量场来分别控制毛发的倒伏与长度,向量场通过对各个顶点的偏移方向和偏移程度进行设定来控制毛发的倒伏,而标量场通过影响顶点的偏移步长来控制毛发的长度。用户只要通过各种交互手段来修改表面场,就可以达到控制毛发形态的目的。

### 5.1 毛发的倒伏曲线

当生成多层网格面时,每个顶点都是按照一条特定的曲线轨迹进行偏移的。如何决定这条曲线轨迹的形状就成为控制毛发倒伏的首要问题。Bakay 等人采用一种逐段增加弯曲角度的方式来控制草在风中的弯曲<sup>[10]</sup>。如图 4(a)所示,草由一条分段折线来表示,当水平风力作用在这条分段折线上时,折线各端点在水平以及垂直方向的偏移量分别为

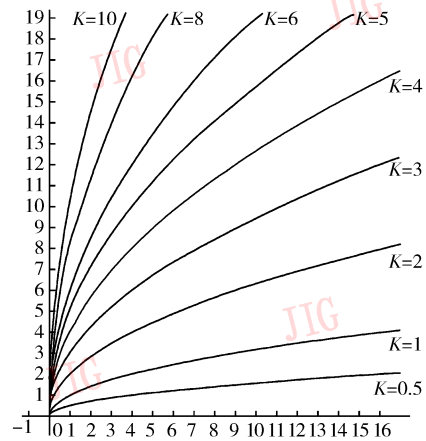
$$\begin{cases} w_i = \sum_{j=0}^i S \sin(\theta) \\ h_i = \sum_{j=0}^i S \cos(\theta) \end{cases} \quad \theta = \frac{i}{N} \frac{\pi}{2} \quad (1)$$



(a) Bakay等人采用倒伏曲线<sup>[12]</sup>

式中, $i$ 表示当前段, $N$ 表示折线的总段数, $S$ 表示每段的长度, $I$ 为风力的大小;折线的偏移方向就是风力的方向。这种方法简单直观,本文系统也采用了这种方法,只不过影响毛发弯曲的不再限于风力,而可以是任何一个有大小和方向的作用力。

但是文献[10]这种方法在处理倒伏程度比较剧烈的情况时往往效果不佳(如图 5(b))。这是由于当倒伏剧烈时,后面的毛发可能会与前面的毛发交叉,造成错误的绘制效果。为了缓解这个问题,本文提出了另一种决定曲线轨迹形状的方法:采用曲线族  $y = Kx^{(1/2)}$  来定义毛发的弯曲。其中参数  $K$  用于控制曲线的弯曲程度。图 4(b)显示了此曲线族的形状。可以看出,在此曲线族中,即使弯曲程度非常剧烈,曲线后部也会逐渐抬高,成斜坡状(而文献[10]方法中的弯曲形状更像圆弧状)。这种形状有助于减少毛发的交叉,宜于表现倒伏剧烈的毛发效果(如图 5(c)所示)。本文系统对这两种弯曲形式都提供了支持,用户可以根据效果自由选用任意一种。



(b)  $y=Kx^{(1/2)}$  形状的倒伏曲线

图 4 毛发的倒伏曲线

Fig. 4 Curves for controlling the slant of fur



(a) 轻微倒伏的毛发

(b) 剧烈倒伏的毛发, 用文献[12]方式倒伏

(c) 剧烈倒伏的毛发, 用  $y=Kx^{(1/2)}$  方式倒伏

图 5 倒伏的毛发

Fig. 5 Slantwise fur

如前所述,本文采用了一个标量场和一个向量场来分别控制各个顶点处的毛发长度和倒伏状态。具体来说,标量场的标量值会影响上述公式中的  $S$  值,从而实现对各顶点处毛发长度的控制。向量场中向量的模值对应于上述公式中的  $I$  或  $K$ ,以控制毛发的倒伏程度;而向量方向就是毛发的倒伏方向。为此,向量场中各顶点处的向量值也被称为该顶点处的倒伏向量。

## 5.2 毛发的造型操作

系统提供了许多针对表面场的操作手段,如插值关键点生成表面场、平滑表面场、扰动表面场等。本文还设计了几种有趣的操作:“梳理”、“风吹”和“引力棒”等。

### (1) 毛发的梳理



(a) 用一把“小梳子”梳理毛发 (b) 梳理后的向量场 (短线代表矢量方向) (c) 梳理后的毛发效果

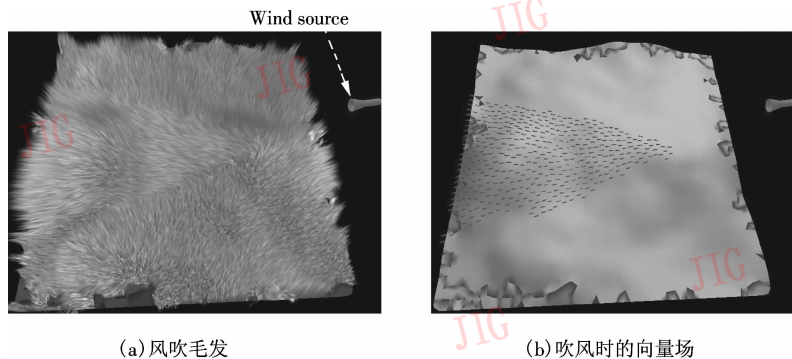
图 6 梳理操作

Fig. 6 Combing operation

### (2) 风吹毛发

本文模拟了风吹毛发使之倒伏的效果,并将之作为一种有趣的造型手段,称为“风吹”操作(如图 7

所示)。在“风吹”操作中,用户可以控制风源位置、风力大小、风的方向以及受风力影响的角度范围,生成许多有趣的效果。



(a) 风吹毛发

(b) 吹风时的向量场

图 7 风吹操作

Fig. 7 Blowing operation

当“风吹毛发时”,计算出模型表面每个顶点所受的“风向量”,然后求出风向量在当前顶点切平面上的分量,利用此分量来影响顶点的倒伏。风向量

的方向是从风源指向当前顶点的方向,如果风向量与风向的夹角超出了当前的风力影响角度范围,则风向量的大小就设为零。

### (3)“引力棒”

用户可以操纵一个虚拟的“引力棒”对毛发表面进行造型。在引力棒作用下,毛发将向引力方向倾斜并可能会被拉长(如图8所示)。在引力棒作用过程中,引力被分解为两部分:拉动毛发趋向引力棒的旋转力和沿着毛发方向的拉伸力。旋转力影响毛发的倒伏向量,从而改变毛发的倒伏趋向。拉伸力则在吸引过程中逐渐累积,当拉伸力累积超过一定阈值,毛发就会被拉长。

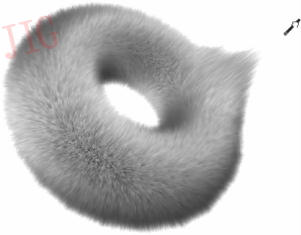
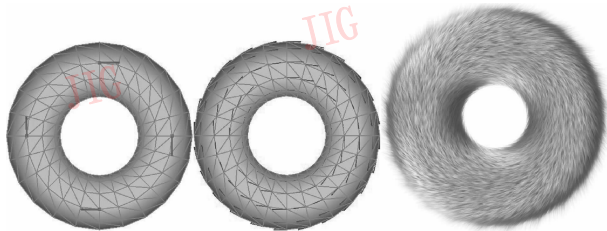


图8 使用“引力棒”进行毛发表造型

Fig. 8 Attractive-stick for fur modeling

### (4)插值操作

事先由用户指定模型表面上几个特定顶点的向量,然后采用插值的方式来生成其他顶点的向量值,从而形成整个表面的向量场,此即称为插值操作。图9显示了这个过程。



(a)用户指定几个向量 (b)插值指定向量生成模型表面的向量场 (c)插值后的毛发效果

图9 插值操作

Fig. 9 Interpolating operation

插值操作可以使用户迅速设定模型表面的整个倒伏趋势,非常方便。本文采用了文献[11]的方法来实现插值操作:对每个顶点,首先采用 Dijkstra 算法<sup>[12]</sup>计算出此点与特定顶点的最小表面距离;然后以这些距离值为参数,按照高斯函数求出相应的权值(权值的和要归一化为1);按照这些权值对特定顶点的场值进行加权平均而得到当前顶点的场值。用公式表示为

$$V(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n \text{GaussWeight}(s_i, \mathbf{p}) \times$$

$$\text{TangentVector}(s_i, \mathbf{p}) \quad (2)$$

式中, $V(\mathbf{p})$ 表示当前顶点 $\mathbf{p}$ 的倒伏向量, $s_i (i = 1, \dots, n)$ 表示用户指定的特定顶点, $\text{GaussWeight}()$ 计算以 $s_i$ 与 $\mathbf{p}$ 点的最小表面距离为参数的高斯权值, $\text{TangentVector}()$ 计算 $s_i$ 点的倒伏向量投影在 $\mathbf{p}$ 点切平面上的向量。

### (5)平滑操作

物体表面上毛发形态的变化一般较为平缓,而用户的造型操作往往会造成毛发形态的剧烈变化,为了保持毛发变化的平缓性,系统提供了平滑操作:对某选定区域的表面场值进行平滑处理,以消除变化剧烈的部分。平滑操作采用文献[13]中的低通滤波操作来完成:遍历选定区域内的顶点,使每个顶点都受其邻域顶点的影响而改变其场值。公式表示如下:

$$V_{\text{new}}(\mathbf{p}) = (1 - t) * V_{\text{old}}(\mathbf{p}) + t * \sum_{i=1}^n \text{Weight}(\mathbf{p}_i) * V(\mathbf{p}_i) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{p}$ 点表示当前顶点, $\mathbf{p}_i (i = 1, \dots, n)$ 表示 $\mathbf{p}$ 点的邻域点,本文以 $\mathbf{p}$ 与 $\mathbf{p}_i$ 点间距离的倒数作为 $\mathbf{p}_i$ 点的权值,即 $\text{Weight}(\mathbf{p}_i)$ ,权值的和要归一化为1。式中的 $t$ 用来控制邻域点对 $\mathbf{p}$ 点的影响程度,可由用户设定。平滑操作可以反复进行多遍,遍数越多,表面场越平滑。用户可以根据观察到的平滑结果来决定是否继续进行平滑。

### (6)扰动与统一

扰动操作指用户可以对某区域内的表面场进行一定程度的扰动,这通过给每个顶点的场值添加随机扰动量来实现。如图10中圆环上的乱毛就主要是通过扰动操作而生成的。统一操作指用户可以使某区域内的场值都趋向于某指定的值,这是通过将指定值与各个顶点的值进行加权求和而完成的,指定值的权重越大,场值越一致。

本文设计的这些造型操作非常直观,而且具有良好的用户界面,用户可以运用这些操作对模型表面的毛发形态进行方便灵活的控制,达到毛发造型的目的。相比于 Maya Fur 等商用毛发造型插件,本文系统的毛发造型手段还不够丰富。但是对于形态较为单一的短毛来说这已经可以满足基本的造型要求。本文系统的优点在于速度,不但可以满足用户造型操作的实时性,而且其造型结果可以直接应用于游戏、虚拟现实等实时领域。

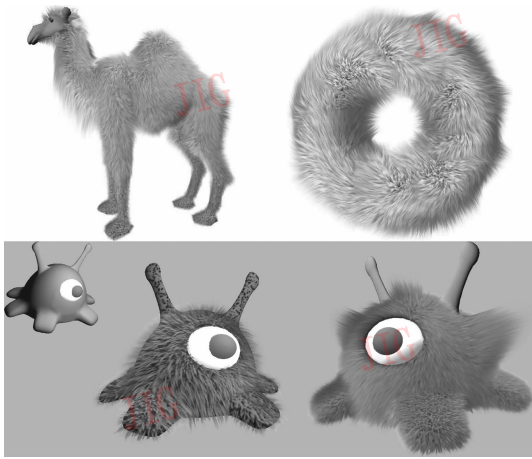


图 10 本文系统的一些造型结果  
(分别是骆驼、圆环和 slug 模型)

Fig. 10 Some furry objects designed with our system  
(Camel, torus and slug model)

## 6 实验结果

图 10 是使用本文造型方法设计的几个例子。从图中可以看出,毛发沿模型表面的各种倒伏趋势、毛发的长度变化以及一些局部性的长毛效果(比如骆驼脖子前的长毛)都可以表现出来,这已经能够满足一般的短毛形态设计要求。本文系统的造型与绘制可以达到实时或交互的效率,并且毛发的绘制效果很好。

我们对系统中造型操作的易用性进行了实验。初次使用者(主要是实验室的研究生)在一定的指导示范下,可以立刻掌握“梳理”、“风吹”、“引力棒”这几种操作,并会乐意尝试运用这些操作进行各种造型创作。其他的几种操作也可以在几分钟内掌握。经过短时间的练习与熟悉,一般用户就可以熟练地利用这些操作进行毛发形态的编辑与修改。

## 7 结论

本文介绍了一个真实感短毛的实时绘制与造型系统,此系统基于非均匀纹理层的毛发表示方法,可以完成毛发纹理的生成、毛发的造型、毛发的真实感绘制等一系列完整的毛发表示功能。由于其造型的方便性与绘制的实时性,该系统对于动画造型设计、游戏、虚拟现实等领域都具有一定的实用意义。

本文的造型系统还无法造型出“卷毛”等复杂形态的毛发,这主要是由于层状纹理切片的毛发表

示方法难以表达这种复杂形态的毛发。在这方面还需要对毛发表达方式作进一步的研究与改进。此外,本文的造型系统目前只考虑了对毛发形态的控制,没有考虑对毛发颜色和密度等属性的交互控制。下一步可以研究如何使用户能够方便地控制毛发的密度和颜色等属性,这方面也许可以借鉴文献[14]提出的在 3 维网格面上直接进行绘制的交互技术。

## 参考文献 (References)

- Xu Z, Yang X D. V-HairStudio: An interactive tool for hair design[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(3): 36 ~ 43.
- Kim T Y, Neumann U. Interactive multiresolution hair modeling and editing[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'02[C], Los Angeles, USA, 2002:620 ~ 629.
- Watanabe Y, Suenaga Y. A trigonal prism-based method for hair image generation[J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1992, 12(1): 47 ~ 53.
- Gelder A V, Wilhelms J. An interactive fur modeling technique[A]. In: Proceedings of Graphics Interface[C], New Jersey, USA, 1997: 181 ~ 188.
- Meyer A, Neyret F. Interactive volumetric textures [A]. In: Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering'98 [C], Vienna, Austria, 1998:157 ~ 168.
- Lengyel J. Real-time fur [A]. In: Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering'00[C]. Vienna, Austria, 2000:243 ~ 256.
- Lengyel J, Praun E, Finkelstein A, et al. Real-time fur over arbitrary surfaces[A]. In: Proceedings of ACM 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics[C], New York, USA, 2001:227 ~ 232.
- Yang G, Sun H Q, Wang W C, et al. GPU-Based realistic fur rendering[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 577 ~ 586. [杨刚,孙汉秋,王文成等.基于 GPU 的真实感毛发绘制[J].软件学报, 2006, 17(3): 577 ~ 586.]
- Yang G, Sun H Q, Wang W C, et al. Real-time fur representation with non-uniform layers of textured slices [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(4): 430 ~ 435. [杨刚,孙汉秋,王文成等.采用非均匀纹理层的短毛实时绘制[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(4): 430 ~ 435]
- Bakay B, Lalonde P, Heidrich W. Real-time animated grass[A]. In: Proceedings of Eurographics'02[C], Saarbruecken, Germany, 2002: 234 ~ 237.
- Praun E, Finkelstein A, Hoppe H. Lapped textures [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'00[C], Los Angeles, USA, 2000: 465 ~ 470.
- Thomas H, Charles E, Ronald L, et al. Introduction to Algorithms, Second Edition[M]. McGraw-Hill: MIT Press, 2001: 326 ~ 328.
- Turk G. Texture synthesis on surfaces [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'01[C], Los Angeles, USA, 2001: 347 ~ 354.
- Igarashi T, Cosgrove D. Adaptive unwrapping for interactive texture painting[A]. In: proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics[C], Los Angeles, USA, 2001:209 ~ 216.