

## 基于 GPU 真实感毛发绘制<sup>\*</sup>

杨 刚<sup>1,4+</sup>, 孙汉秋<sup>2</sup>, 王文成<sup>1</sup>, 吴恩华<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 软件研究所 计算机科学重点实验室,北京 100080)

<sup>2</sup>(香港中文大学 计算机科学与工程学系,香港)

<sup>3</sup>(澳门大学 科学技术学院 电脑与资讯科学系,澳门)

<sup>4</sup>(中国科学院 研究生院,北京 100049)

### GPU-Based Realistic Fur Rendering

YANG Gang<sup>1,4+</sup>, SUN Han-Qiu<sup>2</sup>, WANG Wen-Cheng<sup>1</sup>, WU En-Hua<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2</sup>(Department of Computer Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

<sup>3</sup>(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao, China)

<sup>4</sup>(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62562796, Fax: +86-10-62563894, E-mail: yg@ios.ac.cn, <http://www.ios.ac.cn>

**Yang G, Sun HQ, Wang WC, Wu EH. GPU-Based realistic fur rendering. *Journal of Software*, 2006,17(3): 577–586.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/577.htm>

**Abstract:** Based on the multi-layer textures approach, a new method of rendering real-time fur is proposed. The method takes full advantage of the new features of current Graphic Processing Units to compute the lighting of fur precisely and fast. More importantly, the self-shadow effect of fur and the soft shadow phenomenon over fur are simulated successfully, which enhances the rendering effects greatly. Experiments show that the method can deal with moderate models in real-time, which is very valuable for the applications of fur in many fields, such as cinema, video game and virtual reality etc.

**Key words:** fur; soft shadow; realistic image synthesis; hardware-based rendering

**摘 要:** 基于毛发的多层纹理表达方法,提出一种毛发实时绘制方法.该方法充分利用图形处理器的绘制功能,不仅能对毛发进行高精度快速的光照计算,而且能够高效地模拟毛发间的自阴影效果以及物体其他部分在毛发上遮挡形成的软影现象,以增强毛发的真实感效果.实验结果表明,该方法能够实时处理中等规模的模型,这对于毛发物体在电影、游戏和虚拟现实等领域的应用具有重要的价值.

**关键词:** 毛发;软影;真实感绘制;基于硬件的绘制

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60473105, 60373051 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312102 (国家重点基础研究发展规划(973)); the RGC (Research Grant Council) Research Grant of Hong Kong under Grant No.4181/03E (香港研究资助局研究基金); the Research Grant of University of Macau (澳门大学研究基金)

Received 2004-09-16; Accepted 2005-05-23

毛发是许多物体的重要外表特征.为了逼真地表达这些毛茸茸的物体,毛发的真实感绘制是一个不可避免的问题.一般而言,物体上的毛发个体数量巨大,而单根毛发又非常细小.因此,毛发的绘制计算,尤其是毛发阴影效果的计算非常困难.

近年来,毛发的建模、绘制以及动画已经成为一个研究热点,如瑞士的 MIRA 实验室在毛发的仿真方面进行了一系列深入的研究<sup>[1,2]</sup>.2004 年的 Siggraph 大会还专门设立了一个关于毛发仿真的专题<sup>[3]</sup>.不过,这些工作主要针对较长的头发进行研究,并不适用于表现那种布满动物体表的短毛效果.目前,针对短毛的绘制与表示,主要有以下一些工作.Reeves<sup>[4]</sup>采用粒子系统来表示毛发.Perlin 等人<sup>[5]</sup>提出使用过程纹理来绘制毛绒状物体.最经典的是 Kajiya<sup>[6]</sup>提出的利用体纹理来表示毛发的思想.他把一片毛发表示成一块记录密度和反射特性分布的体纹理,并采用光线跟踪的方法进行绘制,生成了非常逼真的短毛效果.近年来,许多三维动画电影采用几何建模的方法来表示毛发<sup>[7,8]</sup>.它们将每根毛发表示成一串三角片或圆锥体,并进行反混淆以及复杂的光照计算,从而生成令人满意的绘制效果.以上这些方法的绘制速度都很慢,无法满足实时绘制的要求.Gelder<sup>[9]</sup>等人曾提出一种简化的几何建模方法,将毛发表示为一根根折线进行绘制.这种方法虽然达到了实时和交互的要求,但其绘制效果并不令人满意,而且毛发数量也不能太多.Lengyel<sup>[10,11]</sup>在 2000 年提出采用多层纹理来表达毛发的方法.他把一块毛发体纹理切成多层二维纹理,并将它们分别映射到多层网格面上,再对这些网格面进行融合绘制以产生毛发效果.Lengyel 方法可以利用图形硬件的显示流程来实现,使绘制达到了实时和交互的要求,并且具有较好的绘制质量.但是,Lengyel 方法在毛发的真实感计算方面仍有很大的不足.(1) Lengyel 方法对毛发进行的光照计算并不精确.它只对模型面片的每个顶点进行光照计算,而面片内各个毛发的光照值靠插值顶点的值来近似.这种近似误差较大,容易造成毛发的模糊现象.(2) Lengyel 方法没有考虑毛发之间相互遮挡形成的阴影现象(称为毛发自阴影),以及物体其他部分在毛发表面上遮挡形成的软影效果,而这些光照效果对于逼真地表现毛发具有重要作用.

为了对毛发进行实时的高度真实感的绘制,本文基于短毛的多层纹理表达方法,提出一种新的毛发绘制计算方法,能够快速、有效地计算出毛发间的自阴影效果以及由于物体其他部分遮挡而在毛发表面形成的软影现象.该方法的主要贡献是:

- 利用图形处理器(GPU)的像素可编程功能,把毛发的光照计算精确到了像素级别.
- 提出一种“层状阴影图”的技术,实现了毛发自阴影效果的模拟.
- 在 Krisch 算法的基础上进行加速处理,能便捷地实现由于遮挡关系而在毛发上产生的软影.

本文第 1 节简要介绍 Lengyel 提出的利用多层纹理来表示毛发的方法.第 2 节讲述如何利用 GPU 的像素可编程功能对毛发进行精确的光照计算.第 3 节讨论用“层状阴影图”实现毛发自阴影效果的模拟.第 4 节讨论毛发表面上软影效果的生成.最后给出新方法的总体流程、实验结果和结论.

## 1 Lengyel 方法简介

Lengyel 方法可以概括为如下 3 个步骤,其中前两步属于预处理,第 3 步是实时绘制.

第 1 步. 采用粒子系统的方法生成一块表现毛发效果的三维体纹理.对这块体纹理进行水平采样,得到多层二维纹理.这些二维纹理称为 shell 纹理,其纹理元素含有“RGBA”4 个分量,“RGB”表示相应位置的毛发颜色值,“A”(即 alpha 分量)表示不透明度.

第 2 步. 利用 lapped texture<sup>[12]</sup>方法生成模型的纹理坐标,以解决 shell 纹理到模型表面的映射问题.

第 3 步. 由里向外逐层绘制多层网格面.绘制时,每层网格面都映射相应层次的 shell 纹理,并按照 shell 纹理的 alpha 值进行融合绘制.最里层的网格面就是模型本身,外层网格面由模型表面沿法向平移一定距离形成.

Lengyel 采用了针对毛发的特殊光照模型<sup>[6]</sup>,并以软件的方式实现光照计算.其采用的光照模型为

$$\text{HairShading} = ka + kd \times C_{\text{hair}} \times (1 - (T \cdot L)^2)^{pd/2} + ks \times (1 - (T \cdot H)^2)^{ps/2} \quad (1)$$

其中, $T$  表示毛发的方向, $L$  是光线方向, $H$  是光线和视线夹角的角平分线方向, $ka$ , $kd$  和  $ks$  分别表示环境光、散射光和高光的颜色, $pd$  和  $ps$  是散射光和高光的指数, $C_{\text{hair}}$  表示当前像素的毛发颜色.

由于采用软件的方式进行光照计算,Lengyel 方法不能逐个像素地进行光照计算,它只是对模型面片的每个顶点计算光照,而对面片内部点的光照值(即面片在帧缓存中所覆盖的每个像素的光照值)通过插值顶点光照值来近似.但是,这种近似并不合理,因为在模形表面绘制毛发时,每个面片上都会“生长”很多根毛发,而这些毛发的方向值(即式(1)中的  $T$ )并不是沿着面片连续变化的.因此,这种插值计算面片内部点的光照值的方法会产生较大的误差,影响绘制效果.

2 利用 GPU 的可编程功能准确实现毛发的光照计算

近年来,随着图形硬件的发展,GPU 具有了顶点级和像素级的可编程功能(即顶点绘制器 vertex shader 和像素绘制器 fragment shader).本文即采用像素绘制器对每个像素的颜色按照式(1)进行计算,从而实现了毛发光照的精确计算.在计算式(1)时,需要得到该像素处的毛发方向(即式(1)中的  $T$ ).为此,在生成 shell 纹理的同时,我们建立一幅“方向纹理”来记录此层毛发的方向.并在绘制时利用方向纹理将像素的  $T$  值输入到像素绘制器中.在 Lengyel 方法的基础上,新方法的具体步骤如下:

预处理阶段:

在采样生成 shell 纹理的同时,求得 shell 纹理中每个点的毛发方向(毛发方向的获取方法与毛发体纹理的生成方式紧密相关.在本文中,单根毛发是采用一系列排成曲线轨迹的粒子来表示的,因此,毛发的方向就是曲线在相应位置的切线方向),并记录在方向纹理中.由此,对于每一层毛发都生成了两幅纹理:shell 纹理和方向纹理.绘制时,每层网格面都同时映射相应层的两幅纹理(使用了 MultiTexture 功能).

绘制阶段:

- 1) 利用顶点绘制器计算每个顶点的  $L$  和  $H$ ,并将  $L$  和  $H$  分别存入该顶点的主颜色和辅助颜色寄存器中.
- 2) 利用像素绘制器按照式(1)计算每个像素的光照值.

在像素绘制器中, $ka,kd,ks,pd$  和  $ps$  对整个绘制来说都是不变的,可以作为常量输入; $L$  和  $H$  则通过颜色寄存器得到;而  $C_{hair}$  和  $T$  可以通过纹理映射的方式分别从 shell 纹理和方向纹理中取得.这样,我们就可以在像素绘制器中按照式(1)进行光照计算,从而准确实现毛发的绘制.

图 1 显示了绘制效果的对比.仔细观察可以看出,本文方法的绘制结果更为清晰,并可以在毛发上实现更为细致的明暗效果.如果在像素绘制器中计算光照时, $C_{hair}$  值取自一幅斑纹纹理,就可以产生斑纹毛的效果<sup>[13]</sup>.图 2(b)就是采用这种方法生成的斑马效果图.

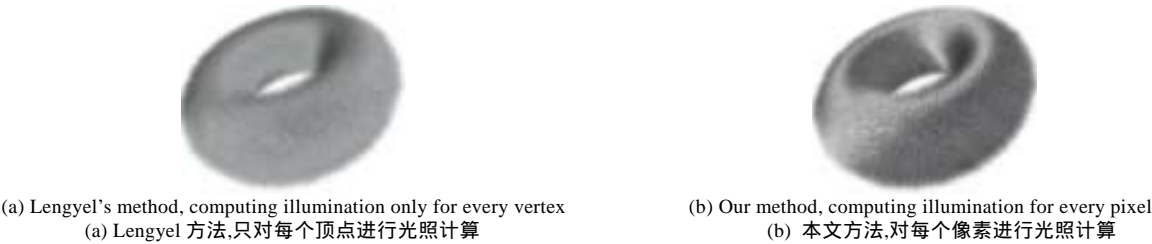


Fig.1  
图 1



Fig.2 Some rendering results  
图 2 一些绘制结果

采用以上的绘制流程,不但可以使毛发的光照计算更为准确,而且借助像素绘制器,还为实现毛发复杂的阴影效果创造了条件.下面两节就来讨论如何模拟毛发的各种阴影现象.

### 3 毛发自阴影效果的模拟

当光线照射在毛绒状物体表面时,由于毛发的遮挡作用,会使光线发生衰减,从而在毛发空间中形成阴影,这种现象称为毛发自阴影.自阴影现象对于真实地表现毛发非常重要<sup>[14]</sup>.但是,毛发数量众多,而且单根毛发非常细小,这使毛发自阴影的计算非常困难.Lengyel 并没有仔细考虑自阴影现象,他只是在绘制多层网格时让光照值从上向下逐层递减来粗略地反映自阴影效果.本文力图较为准确地模拟毛发自阴影现象,以提高绘制效果.

Shadow mapping 方法<sup>[15]</sup>是最常用的计算阴影的方法,但是它不适合处理毛发等由许多细小单元组成的场景,而且也不能用来处理半透明物体的阴影.Tom Lokwe 等人在 2000 年提出了 Deep shadow maps 方法<sup>[16]</sup>,专门处理由大量细小单元组成的场景的阴影计算问题,但是其速度较慢,不能满足实时的要求.之后,Tae-Yong Kim 提出了 Opacity shadow maps 方法<sup>[17]</sup>,可以较快地处理由许多细小的半透明单元组成的场景.但是,这种方法需要将场景分成许多微小的 particle 来表示,不适合本文的毛发绘制流程.针对本文方法中毛发分层表示的特点,我们提出一种“层状阴影图”方法,能够很好地实现毛发自阴影效果的模拟.

在公式(1)的基础上,我们采用如下的绘制公式来反映毛发自阴影的作用:

$$\text{HairShading} = ka \times \gamma + [kd \times C_{\text{hair}} \times (1 - (T \cdot L)^2)^{pd/2} + ks \times (1 - (T \cdot H)^2)^{ps/2}] \cdot t \quad (2)$$

式中用  $\gamma$  来控制环境光的逐层衰减,用  $t$  来表现散射光和高光的毛发自阴影效果.其中

$$\gamma = (1 - \varepsilon) \times (n / \text{layerNum}) + \varepsilon, 0 \leq \varepsilon < 1.$$

其中,layerNum 表示网格总层数, $n$  表示当前层距离最内层网格的层数, $\varepsilon$  表示最内层网格所接受到的环境光照值的比率. $\varepsilon$  值的设定与毛发的密度有关,毛发密度越大, $\varepsilon$  值就应当越小.在我们的实现中, $\varepsilon$  值是人工进行调节设定的.在本文的例子中, $\varepsilon$  值都取为 0.3.式中的  $t$  表示光线穿过各层毛发到达当前像素时的剩余光照值的比率.

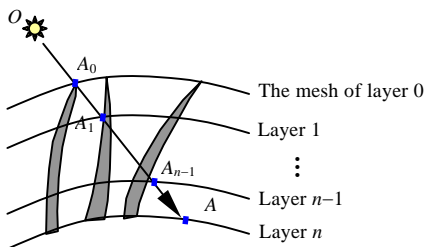


Fig.3 The attenuation of lighting

图 3 光线的衰减

如图 3 所示(图中的 3 根毛发仅起示意作用,事实上,毛发是由各层网格的纹理进行融合而表示出来的),当光线穿过各层毛发发射到 A 点时,由于各层毛发的遮挡,使 A 点处于阴影区.我们就用光照到达 A 点时的衰减程度来反映 A 点的阴影程度.设光线 OA 与各层交点  $A_0, A_1, \dots, A_{n-1}$  的不透明度分别为  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$  (某点处的不透明度就是该点所映射的 shell 纹理的 alpha 分量),这样,当光线到达 A 点时,其剩余光照比率为

$$t = (1 - \alpha_0) \times (1 - \alpha_1) \times \dots \times (1 - \alpha_{n-1}).$$

为了求得各层像素点相对于当前光源的  $t$  值,我们提出了“层状阴影图”法:采用投影绘制的方式为每层毛发生成一副“阴影图”,这幅阴影图中记录了此层毛发中所有能看见光源的点的  $t$  值.下面进行具体介绍.

#### 3.1 生成层状阴影图

我们只考虑单个点光源造成的毛发自阴影效果,而且只考虑上层对下层毛发遮挡所形成的阴影.在实际情况中,模型轮廓边处有可能会出现同一层毛发之间甚至是下层对上层毛发的遮挡,本文忽略这种情况所造成的阴影.实验结果表明,这种忽略对绘制效果的影响很小.

我们以光源为视点,采用投影绘制的方式从外向内依次生成各层的阴影图.如图 4 所示, O 点表示光源位置,梯形区域 ABCD 表示以光源为视点时的视域;深灰色物体表示模型,一层层曲线表示绘制毛发时的多层网格面.网格从外向内标记为  $m_0, m_1, \dots, m_n$ , 其中网格  $m_i$  所对应的相应层 shell 纹理标记为  $\text{shellTex}_i$ , 由  $m_i$  所生成的阴影图标记为  $\text{shadowMap}_i$ .生成阴影图的具体步骤如下:

- 1) 最外层毛发不会受到毛发自阴影的影响,因此不需要为  $m_0$  生成阴影图,  $\text{shadowMap}_0$  为空.
- 2) 求  $m_1$  的阴影图.

将背景设为白色,以光源为视点绘制网格  $m_0$ ,在  $m_0$  上映射纹理  $shellTex_0$ ,利用像素绘制器进行绘制,令每个像素的绘制值为  $pixelColor=1-\alpha$ ,其中  $\alpha$  表示当前像素所映射的  $shellTex_0$  纹理值的  $\alpha$  分量,也即此像素点的不透明度.将绘制结果保存为纹理  $shadowMap_1$ ,这样,通过绘制操作,我们就得到了由于最外层毛发遮挡而在  $m_1$  层上形成的阴影图.

### 3) 求 $m_2$ 的阴影图.

将背景设为白色,以光源为视点绘制网格  $m_1$ ,在  $m_1$  上映射两幅纹理: $shellTex_1$  和  $shadowMap_1$ ( $shadowMap_1$  是在上一步刚刚生成的).利用像素绘制器进行绘制,令像素的绘制值为  $pixelColor=t\times(1-\alpha)$ ,其中  $t$  表示当前像素所映射的  $shadowMap_1$  纹理值,而  $\alpha$  是此像素的  $shellTex_1$  纹理值的  $\alpha$  分量.按照此公式得到的  $pixelColor$  值就是表示光线穿过  $m_0$  和  $m_1$  后的剩余光照值.将绘制结果存为一幅纹理,即得  $shadowMap_2$ .

需要注意的是,在网格  $m_1$  上映射纹理  $shadowMap_1$  时采用了“投影纹理坐标”.如图 4 所示,顶点  $E$  的纹理坐标就是将该点沿光线投影到视平面  $AB$  上的位置(即点  $F$  的位置).用公式  $TexCoord_E=P\times M\times Pos_E$  可以计算出  $E$  点的纹理坐标.其中  $Pos_E$  表示  $E$  点在世界坐标系中的位置, $M$  和  $P$  分别表示以光源为视点进行绘制时的模型变换矩阵和投影矩阵.本文按照上述公式,利用顶点绘制器来计算每个顶点的纹理坐标.在下面的介绍中,阴影图采用的都是这种映射方式.

### 4) 顺次求取 $m_3\sim m_n$ 的阴影图.

所用方法与求  $shadowMap_2$  时类似.例如,求  $m_i$  层的阴影图,则将背景设为白色,以光源为视点绘制网格  $m_{i-1}$ ,在  $m_{i-1}$  上映射两幅纹理: $shellTex_{i-1}$  和  $shadowMap_{i-1}$ ,并令像素的绘制值为

$$pixelColor=t\times(1-\alpha).$$

按此方式得到的  $pixelColor$  值就表示光线穿过  $m_0\sim m_{i-1}$  层后的剩余光照值.将绘制结果存为一幅纹理,即得  $shadowMap_i$ .

按照上述过程,我们共进行了  $n$  遍绘制,生成了  $n$  幅阴影图.图 5 显示了采用此算法生成的第 1、2、8、15 层(此处  $n=15$ )的阴影图.图中越黑的部分表示受遮挡的程度越大.可以看到,由外向内各层的阴影逐渐加重,当到达最内层时,已经几乎全都处于阴影区中了.

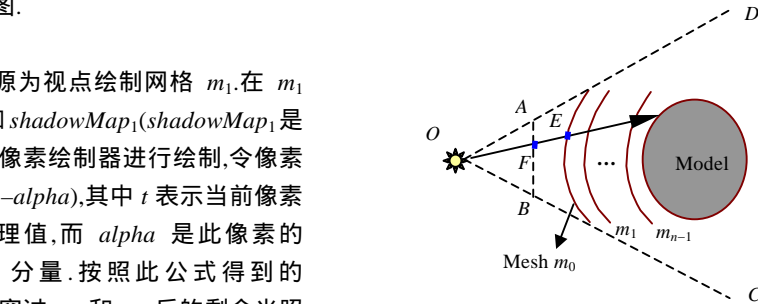
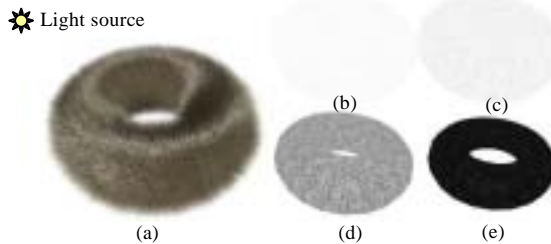


Fig.4 Generating multi-layer shadow maps by rendering scene from the light source of eye

图 4 以光源为视点进行绘制,生成各层阴影图



(a) The light source and object; (b),(c),(d) and (e) are the shadow map of layer 1, 2, 8 and 15 respectively

Fig.5 Layer-Wise shadow maps

图 5 层状阴影图

## 3.2 绘制带有自阴影效果的毛发

利用层状阴影图,可以绘制出带有自阴影效果的毛发.具体过程如下:

- 1) 在绘制多层网格时,每层网格映射 3 幅纹理,分别是此层的  $shell$  纹理、方向纹理和阴影图.
- 2) 采用像素绘制器进行绘制计算时,按照式(2)计算每个像素的颜色.公式中的  $t$  值利用纹理映射的方式从

阴影图中取得.

图 6 是采用这种方法生成的阴影效果.为了突出表现阴影,我们将毛发密度设置得很稀.可以看到,一根根毛发的阴影都正确地显示在模型表面上,而且所产生的阴影呈现出软影的效果.由此可见,“层状阴影图法”可以正确表现毛发的自阴影.图 7 是有自阴影和不自阴影的绘制效果对比,明显看出,带有自阴影的毛发效果更为逼真.



Fig.6 Furs' shadow over model surface

图 6 模型表面上的毛发阴影

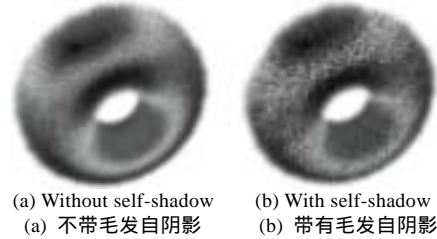


Fig.7

图 7

### 3.3 背光面毛发的光照

式(2)并没有考虑背光面的问题,会使绘制结果中出现背光面毛发依然被照亮的错误.为了解决这个问题,我们设计了一个衰减因子,使光照在物体轮廓线附近的一定范围内逐渐减少为 0,从而使背光面毛发自然地过渡到阴影区.衰减因子定义为

$$Attenu_{Back} = \begin{cases} 1, & \text{if } N.L \geq 0 \\ Clamp_{[0,r]}(N.L + r) / r, & \text{otherwise} \end{cases}$$

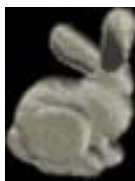
其中,  $N.L$  表示当前顶点的法向量和光线方向向量的点积;  $r$  用来控制发生光照衰减的范围,  $0 < r < 1$ . 函数  $Clamp_{[0,r]}(p)$  表示将参数  $p$  截取到  $[0,r]$  范围之内.按照上述计算,在  $N.L$  从 0 变到  $-r$  的过程中,  $Attenu_{Back}$  值会从 1 逐渐减少到 0.我们利用顶点绘制器计算出每个顶点的  $Attenu_{Back}$  值,并在像素绘制器中利用公式

$$HairShading = ka \times \gamma + [kd \times C_{hair} \times (1 - (T \cdot L)^2)^{pd/2} + ks \times (1 - (T \cdot H)^2)^{ps/2}] \times t \times Attenu_{Back}$$

计算像素的光照.式中将散射光和高光分量都乘以  $Attenu_{Back}$  因子,以达到衰减背向面光照的目的.

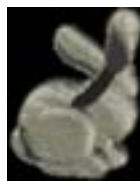
## 4 毛发表面软影效果的模拟

由于物体本身的遮挡,会在毛发表面形成阴影区.这种阴影现象对于真实地表现场景具有重要作用.采用 shadow mapping 方法<sup>[15]</sup>可以生成硬影的效果(如图 8(b)所示),但是硬影缺乏全局光照的感觉,而且对于毛绒绒的物质来说,硬影显得尤其不自然.为了更逼真地绘制毛发,本文模拟了毛发表面的软影效果.



(a) The result without shadow effect

(a) 表面无阴影区



(b) Shadow effect generated by shadow mapping<sup>[15]</sup>

(b) 采用 shadow mapping 方法<sup>[15]</sup>生成的硬影效果



(c) Soft shadow effect generated by our method

(c) 采用本文方法生成的软影效果

Fig.8 Comparison of shadow effect on the furry surface

图 8 毛发表面阴影效果的对比

Lengyel 曾经在文献[10]中采用“splatting”方法模拟毛发表面的软影效果.但是他的方法需要将模型中有遮挡关系的各个部分划分开来,分别进行处理,而且要求模型是参数化曲面.这些限制条件使 splatting 方法不能用于任意曲面上的毛发绘制.Kirsch 在 2003 年提出一种实时的软影生成方法<sup>[18]</sup>.该方法预先先生成两幅图:深度图(depth map)和影区距离图(shadow-width map),其中影区距离图记录阴影区中每个点距阴影区边界的最短距离.



在绘制时,利用深度图可以判断当前点是否处于阴影区;如果处于阴影区,就查找影区距离图得到当前点到阴影区边界的距离,以此决定当前点的光线衰减量.本文即采用 Kirsch 的思想来生成毛发的软影效果,但对 Kirsch 方法中生成影区距离图的过程进行了修改,使之可以适用于本文的问题.

Kirsch 采用两个步骤生成影区距离图.第 1 步,以光源为视点,用白色绘制所有遮挡物,生成一幅“影区图(inverted occlusion map)”;第 2 步,在影区图的基础上采用迭代计算的方法,并利用图形硬件功能来生成影区距离图.本文对这两个步骤进行的修改如下:

在第 1 步中,本文要处理的是物体其他部分在毛发表面的软影,这其实是模型的自阴影,无法事先区分出遮挡物和被遮挡物.为此,在生成影区图时,我们通过进行深度比较来区分遮挡部分和被遮挡部分,并采用了“背向面剔除”的绘制方式.通过这些措施,绘制生成的影区图就可以记录下投影在模型正向面上的所有阴影区域.

在第 2 步中,Kirsch 采用多遍绘制的方式来迭代计算影区图中每个像素点到影区边界的距离.由于需要多遍绘制(一般不小于 8 遍),而且每一遍都要将绘制结果保存为纹理,因此比较耗费时间.我们注意到,Kirsch 方法本身就是一种近似的方法,而且人们对软影的形状并不敏感,并没有必要求出准确的距离.利用这一点,本文采用了一种更快速的方法来生成近似的影区距离图.假设影区图的分辨率是  $n \times n$ ,并且带有 Mip-map 信息.我们首先把影区图绘制到一个较低分辨率的窗口中(比如  $(n/4) \times (n/4)$  的窗口),并将绘制结果保存为一幅临时纹理;然后再将这幅临时纹理绘制到一个  $n \times n$  的窗口中,并把绘制结果保存为纹理,即得影区距离图.上述过程只需要两遍简单的绘制,速度很快.可以看出,这种方式相当于利用硬件的 Mip-map 功能和纹理插值采样功能对影区图进行了一个低通滤波,使影区图中的影区边界变得模糊,其影区边缘附近像素点的灰度值就可以用来近似代表该点距离影区边界的距离.实验证明,这种方法生成的影区距离图可以满足绘制软影的要求.

## 5 新方法流程

基于前面各节的讨论,本文提出的毛发真实感绘制方法的总体流程是:

1) 采用第 3.1 节的方法生成“层状阴影图”.

2) 生成深度图.以光源为视点绘制模型,利用硬件扩展功能 ARB\_depth\_texture 就可以生成场景深度图.图中记录了每个光源可见点距光源的距离.

3) 生成影区距离图.首先生成“影区图”.将场景设为黑色,并打开“背向面剔除”功能,以光源为视点绘制模型;模型表面映射深度图.在绘制过程中,将每个像素的深度与此像素对应的深度图值进行对比,如果大于深度图中的值,就把这个像素的颜色赋为白色,否则赋为黑色.将绘制结果存为一幅纹理,即得到影区图.然后,采用前面介绍的方法对影区图进行缩放绘制,生成影区距离图.

4) 绘制带阴影效果的毛发.在绘制多层网格时,每层网格映射 5 幅纹理:shell 纹理、方向纹理、阴影图、深度图和影区距离图.采用像素绘制器计算像素光照时,使用式(3):

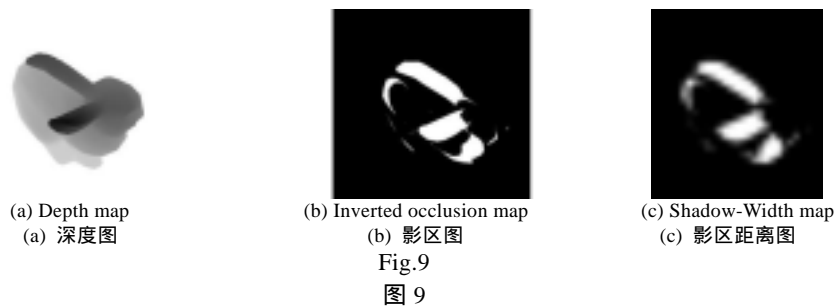
$$\text{HairShading} = k_a \times \gamma + [k_d \times C_{\text{hair}} \times (1 - (T \cdot L)^2)^{pd/2} + k_s \times (1 - (T \cdot H)^2)^{ps/2}] \times t \times \text{Attenu}_{\text{Back}} \times \text{Attenu}_{\text{Shadow}}(sd, sw).$$

其中  $\text{Attenu}_{\text{Shadow}}$  用来控制产生软影区,

$$\text{Attenu}_{\text{Shadow}}(sd, sw) = \begin{cases} 1 & \text{if } sd = 0 \\ 1 - C_{\text{scale}} \times \frac{sw}{sd} & \text{otherwise} \end{cases},$$

并将其值截取到  $[0, 1]$  范围之内.式中  $sd$  表示当前像素深度值减去 depth map 中的值所得的差,  $sd=0$  表明当前像素不属于阴影区,光线不衰减;  $sw$  就是当前像素所映射的 shadow-width map 值,表示此像素点到阴影区边缘的距离;  $C_{\text{scale}}$  用于控制半影区的大小.对  $\text{Attenu}_{\text{Shadow}}(sd, sw)$  函数的更详细解释可以参见文献[18].

式(3)同时考虑了毛发自阴影、背向面光照衰减和软影效果.图 8(c)就是按这种方法绘制的结果,可以看到兔子耳朵在模型表面投下的软影区域.图 9 是按图 8 的光源位置进行绘制得到的深度图、影区图和影区距离图.



6 实验结果

前面已经给出了一些绘制结果.图 10 是各阶段绘制效果的对比.可以看出,通过对像素光照的准确计算以及对毛发各种阴影现象的模拟,毛发得到了更为逼真的绘制.图 2(a)表现了倒伏的毛发效果.可见,通过对毛发自阴影的模拟,可以使倒伏的毛发体现得更为清晰,这在 Lengyel 方法中是很难表现出来的.图 2(b)则是映射了斑纹纹理的毛发效果(见第 2 节所述).在实验中,我们采用了  $64\times64\times16$  的毛发体纹理,水平采样得到 16 层二维纹理,每幅分辨率是  $64\times64$ ;当生成毛发自阴影时,阴影图的分辨率为  $512\times512$ ;用于产生毛发表面软影的深度图和影区距离图的分辨率都是  $512\times512$ .本文工作进行实验的微机配置为 P4 1.3G,512M 内存,GeForceFX5700 Ultra 显卡,128M 显存.表 1 列出了本文方法的实验数据.

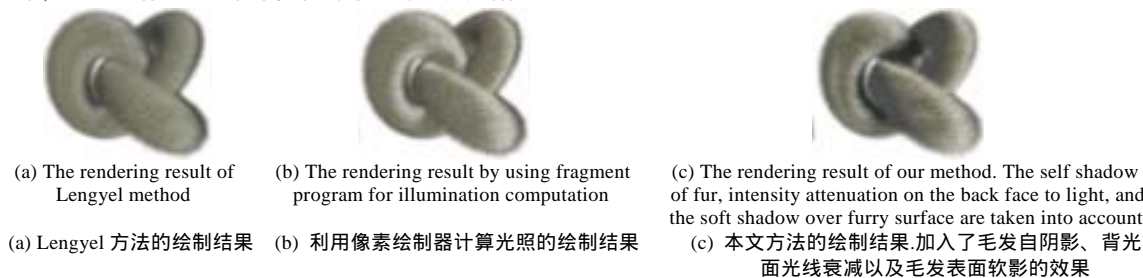


Fig.10  
图 10

Table 1 Model complexities and rendering rates  
表 1 模型面片数及绘制速度的统计

| Model   | Torus | Bunny | Knot (Fig.10) | Clothes | Zebra |
|---|-------|-------|---------------|---------|-------|
| Triangle number   | 567   | 5 000 | 2 880         | 1 401   | 6 010 |
| The time of generating layer-wise shadow maps (ms)                | 80    | 100   | 100           | 90      | 110   |
| The time of generating depth map and shadow-width map (ms)        | 15    | 20    | 15            | 15      | 15    |
| Rendering rates without shadow effect simulation (fps)            | 65.3  | 16.7  | 20            | 33.4    | 14.3  |
| Rendering rates with self shadow and soft shadow simulation (fps) | 38.7  | 10.5  | 12            | 20      | 9.2   |

表 1 中“无阴影效果的绘制速度”是指采用像素绘制器,按照式(1)进行绘制的速度.从表 1 中可以看出,带有阴影效果的绘制速度比不带阴影效果的速度慢大约三分之一,但仍然能达到实时绘制的要求.表中第 3 和第 4 项统计出了为模拟阴影效果而生成各种辅助纹理(层状阴影图、深度图和影区距离图)的时间,这段时间加起来大约有 100ms.当光源相对于模型的位置发生改变时,这些辅助纹理都需要重新计算,这会降低绘制速度,但整体的绘制速度仍能满足交互的要求.事实上,在绘制生成各种辅助纹理时,绘制本身所花费的时间很少,大部分时间(70%~90%的时间)都花在“将绘制结果保存为一幅纹理”这一操作上.如果将来人们能在图形硬件上开发出针对这种“保存纹理”的快速操作,将能使本文的方法更好地满足实时绘制的要求.



## 7 结论以及进一步的工作

基于 Lengyel 的毛发绘制方法和 GPU 的新型绘制功能,本文提出了高效的毛发真实感绘制方法.新方法使毛发的光照计算更为精确,能够很好地体现毛发的自阴影和由于物体间遮挡而产生的软影,提高了毛发的真实感效果.同时,新方法可以用于任意模型上毛发光照的快速计算,并能实时处理中等规模的模型.这对于毛发物体在电影、游戏以及虚拟现实等领域的应用具有重要的价值.

在短毛的实时绘制方面,可以在以下几方面展开进一步的工作:

- 实现多种形态的毛发.本文方法生成的毛发形态较为单一,而自然界中毛发的形态是多种多样的,如卷毛,乱毛,湿毛,倒伏的毛发等等.需要进一步研究模拟这些毛发形态的方法.
- 动态毛发的模拟.对于采用纹理来绘制毛发的方法,实现动态毛发一直是难点.Lengyel 方法虽然可以通过移动网格层来模拟变化不大的动态毛发,但局限性很大.这方面有待进一步的研究.
- 毛发的梳理与修剪.如果能够模拟日常生活中的“梳理”和“修剪”等动作,将使用户能够方便地对模型表面的毛发效果进行修改.这是一件非常有意义的事情.由于 Lengyel 方法本身的局限性,以其为基础实现毛发的梳理与修剪将面临许多问题,需要进一步地加以研究.

## References:

- [1] Magnenat-Thalmann N, Hadap S, Kalra P. State of the art in hair simulation. In: Proc. of the Int'l Workshop on Human Modeling and Animation. Seoul: Computer Graphics Society, 2002. 3–9.
- [2] Volino P, Magnenat-Thalmann N. Animating complex hairstyles in real-time. In: Proc. of the ACM Symp. on Virtual Reality Software and Technology 2004. Hong Kong: ACM Press, 2004. 122–129.
- [3] Magnenat-Thalmann N. Siggraph2004 course note #9: Photorealistic hair modeling, animation, and rendering. 2004. <http://www.siggraph.org/s2004/conference/courses/9.php?pageID=conference>.
- [4] Reeves WT. Particle systems--A technique for modeling a class of fuzzy objects. ACM Trans. on Graphics, 1983,2(2):91–108.
- [5] Perlin K, Hoffert EM. Hypertexture. In: Proc. of the SIGGRAPH'89. Boston: ACM Press, 1989. 253–262.
- [6] James K, Timothy K. Rendering fur with three dimensional textures. In: Proc. of the SIGGRAPH'89. Boston: ACM Press, 1989. 271–280.
- [7] Bredow R. Fur in stuart little. In: SIGGRAPH 2000 Course Notes #14. 2000.
- [8] Fong M. Animating Monster Fur. In: SIGGRAPH 2001 Course Notes #36. 2001.
- [9] Van Allen G, Wilhelms J. An interactive fur modeling technique. In: Proc. of the Conf. on Graphics Interface'97. Toronto: Canadian Information Processing Society, 1997. 181–188.
- [10] Jed L. Real-Time fur. In: Eurographics Workshop on Rendering 2000. Brno: Springer-Verlag, 2000. 243–256.
- [11] Jed L, Praun E, Finkelstein A, Hoppe H. Real-Time fur over arbitrary surfaces. In: Proc. of the Symp. on Interactive 3D Graphics 2001. ACM Press, 2001. 227–232.
- [12] Praun E, Finkelstein A, Hoppe H. Lapped textures. In: Proc. of the SIGGRAPH 2000. New Orleans: ACM Press, 2000. 465–470.
- [13] 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).
- [14] Goldman DB. Fake fur rendering. In: Proc. of the SIGGRAPH'97. Los Angeles: ACM Press, 1997. 127–134.
- [15] Williams L. Casting curved shadows on curved surfaces. In: Proc. of the SIGGRAPH'78. Atlanta: ACM Press, 1978. 270–274.
- [16] Lokovic T, Veach E. Deep shadow maps. In: Proc. of the SIGGRAPH 2000. New Orleans: ACM Press, 2000. 385–392.
- [17] Kim TY, Neumann U. Opacity shadow maps. In: Proc. of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques. London: Springer-Verlag, 2001. 177–182.
- [18] Kirsch F, Doellner J. Real-Time soft shadows using a single light sample. Journal of Winter School on Computer Graphics, 2003,11(1):255–262.

