

## 利用 GPU 对 3D 角色模型绘制水墨效果

方建文<sup>1,2)</sup> 于金辉<sup>2)\*</sup> 姚 琤<sup>3)</sup> 彭 韧<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (衢州学院信息与电子工程系 衢州 324000)

<sup>2)</sup> (浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

<sup>3)</sup> (浙江大学计算机科学与技术学院 杭州 310027)

(qzfw@163.com)

**摘 要** 在 GPU 内利用非线性纹理映射以及模型表面法向量和视点向量之间的夹角来模拟线条的粗细及浓淡变化,解决了在某些视角条件下非线性纹理映射导致的大面积黑斑问题.模型表面的淡墨晕染通过模型上指定的某点位置与其他各顶点连线向量和该点法向量夹角信息进行控制.实现了水墨效果的 3D 角色在 3D 水墨效果场景中的实时漫游.

**关键词** GPU ;非真实感绘制 ;实时绘制 ;中国水墨画 ;动画

中图法分类号 TP391

## GPU Supported 3D Character Model Rendering of Chinese Painting Effects

Fang Jianwen<sup>1,2)</sup> Yu Jinhui<sup>2)\*</sup> Yao Cheng<sup>3)</sup> Peng Ren<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Information and Electronic Engineering, Quzhou College, Quzhou 324000)

<sup>2)</sup> (State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

<sup>3)</sup> (College of Computer Science & Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** We adopt a spherical texture mapping technique to simulate the varied width of the stroke on the outlines of the models and eliminate the black area that may appear on the model surface in certain situations. The brightness of the stroke is controlled by the dot product between viewing direction and the normal direction of the surface. We achieved real-time rendering of 3D character models and walk-through of characters in a 3D scene.

**Key words** GPU ; non-photorealistic rendering ; real-time rendering ; Chinese painting ; animation

人物或动物在水墨画中是一个常见的表现主题,在动画以及游戏中往往也离不开这些角色的表现.在动画领域中,我国艺术家成功地创作出水墨画效果动画,并以此在国际上创立了中国动画学派.然而手工制作的水墨效果动画成本非常高,制作周期长,根本不能满足现代动画动辄几十集甚至几百集的要求.如果我们能用计算机手段实时绘制出中国画效果,那么对于缩短水墨风格动画制作周期并

降低成本有着十分重要的意义,此外它还可以应用到水墨风格的游戏.

近年来,非真实感绘制(non-photorealistic rendering, NPR)研究有了较大发展,但绝大多数 NPR 技术都是用软件方法实现的,其中只有一些简单的(如轮廓线提取等)可以达到实时或交互速率,而用软件生成更富有表现力的效果一般是比较费时的. MoXi 系统虽然可以实时地生成水墨效果<sup>[1]</sup>,但它是一个二维

修回日期 2006-09-18. 基金项目:国家自然科学基金(60373007),国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA01Z312),教育部博士点基金(20040335019),浙江省教育厅科研项目(20061240). 方建文,男,1972 年生,硕士,副教授,主要研究方向为计算机动画、非真实感绘制、GPU 绘制. 于金辉,男,1960 年生,博士,研究员,博士生导师,论文通讯作者,主要研究方向为计算机动画、计算机游戏、数字艺术(jhyu@cad.zju.edu.cn). 姚 琤,男,1978 年生,博士研究生,主要研究方向为数字化艺术与设计、数字化设计、创新设计. 彭 韧,男,1968 年生,学士,副教授,主要研究方向为计算机辅助工业设计、计算机用户界面设计.

交互绘画系统,只能在用户画出一笔的过程中实时生成一笔的水墨笔画,并不适合长篇动画制作。

### 1 相关工作

用软件模拟水墨效果已经有不少文献报道,其中包括水与墨、纸、毛笔等模型研究。Xu 等用一个复杂的物理模型来模拟笔刷运动所形成的书写效果<sup>[2]</sup>;Huang 等介绍了基于物理的墨水扩散效果模型;Yu 等提出了一个墨水与纸相互作用的模型<sup>[4]</sup>;文献[5-6]介绍了如何在 GPU (graphics processing unit) 中用一组非均匀分布的纹理阵列实时绘制多层国画山效果以及云雾和瀑布等;文献[7-8]提出了相似的笔刷模型来处理渲染中的艺术效果。

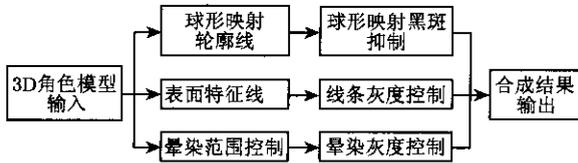


图1 系统框架结构

近年来随着 GPU 的迅猛发展,人们开始利用 GPU 来提高 3D 图形绘制速度。但目前大多数仍是针对真实感图形绘制,只有少部分针对 NPR,如实时水墨画绘制<sup>[9]</sup>、基于图像空间的特征线提取<sup>[10]</sup>、钢笔画<sup>[11]</sup>、halftone<sup>[12]</sup>、铅笔画<sup>[13]</sup>等。我们曾利用 GPU 开发出山水画中常见的物体如山峦,云雾的绘制系统<sup>[5-6]</sup>。在我们以前的工作中发现, GPU 绘制系统的一个显著特点是绘制模块与物体类型紧密相关,由于上述模块的绘制流程并不适合对 3D 动画角色模型进行水墨效果绘制,本文提出如图 1 所示的系统框架实现 3D 动画角色水墨效果的实时绘制。该绘制系统利用 GPU 提供的硬件绘制速度以及灵活的可编程流水线,把绘制过程分为线条绘制和内部晕染 2 部分。线条绘制包括球型映射以及黑斑抑制,表面特征线提取与绘制;内部晕染先确定出范围然后进行灰度控制。系统最后把这 2 部分的结果进行混合,得到最终的具有水墨效果的角色形象。

### 2 球形映射绘制边线及其改进

图 2 所示为一个手工绘制的水墨牛形象。从画面上可以看出,画家用有粗细及浓淡变化的线条来勾勒出牛的轮廓以及身体上的一些特征线,然后用淡墨晕染出身体的部分,其他部分留白。我们基于 GPU 设计的绘制系统的目的就是要在 3D 模型上模拟出这些特征,且绘制速度达到实时。



图2 一个手工绘制的水墨牛形象

Kang 等采用球形映射<sup>[9]</sup>可以在 3D 模型上绘制出宽度变化的边缘线条,所用公式为

$$\begin{cases} R = \alpha(N \cdot E)E - E \\ m = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + (R_z + 1)^2} \\ u = \frac{R_x}{2m} + 0.5 \\ v = \frac{R_y}{2m} + 0.5 \\ \alpha = N \cdot E \end{cases}$$

其中,  $N$  为模型上顶点的法向量,  $E$  是从视点位置到顶点位置的视点向量,  $R$  是  $E$  相对  $N$  的反射向量,  $R_x$  为  $R$  的  $x$  轴分量值,  $R_y$  为  $R$  的  $y$  轴分量值,  $(u, v)$  就是生成的纹理坐标,在绘制轮廓线时通过限制  $\alpha$  值可以控制球形映射的作用范围。

图 3 中第一个图就是用球形映射绘制 Bunny 模型的效果图。然而,球形纹理映射有一个严重的缺点:当一个面的法向量与视点向量接近垂直时,整个面就会都被当作轮廓线绘制,如果该面片附近曲面的曲率较小,则会绘制出大面积黑块。图 3 中还给出了在 4 个视角下的球形映射结果,可以看到 Bunny 的耳朵和身上出现大面积黑斑,从而破坏了我们追求的轮廓线条绘制效果。



图3 球形纹理映射的轮廓线以及球形纹理映射造成的大面积黑斑

为了解决这种大面积黑色块问题,我们用一个线条宽度限制模板与球形映射的轮廓线条宽度进行比较.如果球形映射线条宽度大于模板限制宽度 $w$ ,则按 $w$ 宽度绘制轮廓线条;否则,按照球形映射的宽度绘制轮廓线条.具体实现方法如下:

先用一个 pass 渲染顶点法向图,如图 4a 所示.假设 $PN_0$ 表示顶点法向图上某点 $P$ 的法向量, $PN_1, PN_2, PN_3$ 和 $PN_4$ 表示紧邻 $PN_0$ 的左上、左下、右下和右上 4 个像素点的法向量,我们用 $V = (PN_0 \cdot PN_1, PN_0 \cdot PN_2, PN_0 \cdot PN_3, PN_0 \cdot PN_4)$ 计算得到一个四维向量 $V$ .把 $V$ 中的每个分量与一个门限值 $T_1$ 比较,如果该分量大于门限,则设分量标志为 1,否则为 0.当 4 个分量全部比较之后,只要有一个分量标志为 1,则 $P$ 点设为白色,表示 $P$ 不在特征线上,否则为黑色,表示 $P$ 在特征线上.经上述计算判断可得到一个如图 4b 所示的包括轮廓线和模型表面特征线的二值纹理图 $TM_1$ . $T_1$ 值的大小影响轮廓线的宽度以及模型表面提取的特征线数量, $T_1$ 的值越大,轮廓线越宽,模型内部提取特征线就越多.在系统中我们把 $T_1$ 设成可调.

用第 2 个 pass 对 $TM_1$ 进行膨胀.根据实验我们采用 3 次膨胀取得了令人满意的效果,如图 4c 所示,得到一个新的二值纹理图 $TM$ ,并将它作为模板与球形映射轮廓线进行比较.设球形映射的灰度纹理图为 $TS$ ,如图 4d 所示,我们对 $TM$ 和 $TS$ 进行对应像素点乘法运算,运算的结果 $T_{tmp}$ 用于最终轮廓线以及表面特征线的绘制.

为了进一步控制提取特征线的挥度变化,我们在第 3 个 pass 中用另一个门限 $T_2$ 对 $V$ 中的每个分量进行比较判断,得到二值纹理图 $TM_2$ . $T_1$ 和 $T_2$ 关系为 $T_2 = T_1 - \Delta$ ,其中 $\Delta$ 根据实验取 0.15.相应地 $T_1$ 变化范围限制在 $[0.15, 1]$ .在最终线条合成

过程中对 $TM_1$ 与 $TM_2$ 之间的相异部分用亮一些的灰度进行绘制,使得模型表面的一些特征线看起来更加接近如图 4e 所示的手工绘制效果.

Kang 等<sup>[9]</sup>只采用了黑色绘制模型轮廓,而在图 1 可以看到轮廓线条除了粗细变化外还有浓淡的变化.我们以视向量与模型面片法向量之间的夹角 $\Delta\theta$ 余弦为作为变量,再乘以一个系数 $k$ 来控制轮廓线条的浓淡 $D$ ,即 $D = k(0.5\cos(\Delta\theta) + 0.5)$ .本文系统中采用归一化变量,当 $D=0$ 时表示黑色,当 $D=1$ 时表示白色, $k \in [0, 1]$ 为可调参数,用户需要通过系统界面滑钮控制.

最后用一个 pass 对上述各 pass 结果进行线条的合成.整个线条绘制算法流程如下:

```

绘制法向量到纹理图 TN;
用球形映射绘制得到轮廓线纹理图 TS;
对 TN 用门限 T1 进行特征线提取得到纹理图 TM1;
对 TN 用门限 T2 进行特征线提取得到纹理图 TM2;
对 TM1 进行 3 次膨胀得到限制模板纹理图 TM;
for each pixel in the texture { //合成过程
    Ttmp = TS * TM1;
    if (Ttmp = 0 && TM = 1)
        if (TM1 = 0 && TM2 = 1) color = levelColor +
            (1 - levelColor) * D;
        else color = D;
    }
else color = WHITECOLOR;
}

```

其中, $color$ 是最终绘制的线条颜色; $TN, TS, TM_1, TM_2$ 和 $TM$ 均为用绘制到纹理所得到的相同大小的纹理图; $levelColor \in [0, 1]$ 是一个用户指定的常量,用于控制线条在 $(TM_1 = 0 \&\& TM_2 = 1)$ 条件下的线条起始亮度.图 4e 所示为最后线条合成的结果.



图 4 球形映射轮廓线引起黑斑的抑制过程

### 3 模型表面的晕染

为了模拟手工绘制的晕染效果,我们先在模型

上指定一个控制晕染变化的中心位置 $CP$ .模型表面上任意顶点 $V$ 的晕染灰度 $W = ((V - CP) \cdot N) \times a + b$ ,这里 $N$ 是模型表面顶点 $V$ 的法向量,系数 $a$ 控制晕染的变化速度,系数 $b$ 控制晕染的范围.

为了更好地模拟手工绘制效果,我们可以从手工绘制的水墨画中提取一些晕染效果作为纹理,在绘制时把纹理颜色计算得到的  $W$  按比例进行混合可以得到较好的绘制效果.

## 4 实 验

我们用不同的模型在本文系统中进行水墨画效果绘制,结果如图 5~8 所示. 在图 6 中我们添加了翅膀的淡墨纹理,其余的例子中的淡墨晕染效果是本文系统生成的. 根据本文系统统计数据,在绘制窗口大小为  $834 \times 424$  时,兔子模型面片数量为 4 835,渲染速率为 87.5 帧/s;鸟模型面片数量为 16 206,渲染速率为 70.8 帧/s;牛模型面片数量为 5 804,渲染速率为 86 帧/s;门神模型面片数量为 50 252(全身),渲染速率为 35.8 帧/s. 渲染速度达到了实时绘制的要求.



图 5 兔子



图 6 鸟

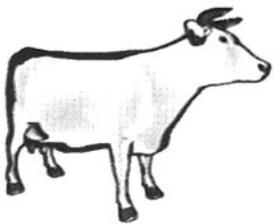


图 7 牛



图 8 门神

## 5 结束语

本文提出一种利用 GPU 实时绘制 3D 角色模型水墨效果的方法,解决了在某些视角条件下球形非线性纹理映射导致的大面积黑斑问题,实现了水墨效果场景中的人物漫游. 本文系统可以用来制作 3D 水墨画效果动画,因为渲染速度达到实时,大大地提高了水墨画动画制作效率,也可以用于制作水墨风格的游戏.

## 参 考 文 献

- [1] Chu Nelson S -H, Tai Chiew-Lan. MoXi: real-time ink dispersion in absorbent paper [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2005: 504-511
- [2] Xu Songhua, Tang Min, Lau Francis, et al. A solid model based virtual hairy brush [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3): 299-308 + 625
- [3] Huang S W, Way D L, Shih Z C. Physical-based model of ink diffusion in Chinese ink paintings[C] //Proceedings of the 11th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen-Bory, 2003: 520-527
- [4] Yu Y J, Lee Y B, Cho H G, et al. A model based technique for realistic oriental painting[C] //Proceedings of Pacific Graphics, Beijing, 2002: 452-453
- [5] Zhang Haisong, Yin Xiaoqin, Yu Jinhui. Real-time rendering of 3D Chinese painting effects[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(11): 1485-1489 (in Chinese)  
(张海嵩, 尹小勤, 于金辉. 实时绘制 3D 中国画效果[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(11): 1485-1489)
- [6] Chen Wei, Zhang Haisong, Yu Jinhui. Hardware accelerated Chinese landscape painting rendering[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(11): 2427-2432 (in Chinese)  
(陈为, 张海嵩, 于金辉. 利用 GPU 实时绘制水墨画效果[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(11): 2427-2432)
- [7] Way D L, Shih Z C. The synthesis of rock textures in Chinese landscape painting [J]. Computer Graphics Forum 2001, 20(3): 123-131
- [8] Yu Y J, Lee D H, Lee Y B, et al. Interactive rendering technique for realistic oriental painting[J]. Journal of WSCG, 2003, 11(1): 538-545
- [9] Kang Shin-Jin, Kim Chang-Hun. Real-time 3D Sumi-e painting [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Diego, California, 2003: 1
- [10] Mitchell Jason L, Brennan Chris, Card Drew. Real-time image-space outlining for non-photorealistic rendering[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Antonio, Texas, 2002: 239
- [11] Praun E, Hoppe H, Webb M, et al. Real-time hatching [C] Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001: 581-586
- [12] Freudenberg B, Masuch M, Strothotte T. Real-time halftoning: a primitive for non-photorealistic shading [C] //Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, Pisa, 2002: 227-232
- [13] Lee Hyunjun, Kwon Sungtae, Lee Seungyong. Real-time pencil rendering [C] //Proceedings of Non-Photorealistic Animation and Rendering '06, Annecy, 2006: 37-45