

## 计算机生成剪纸风格流水动画

涂传朋<sup>1)</sup> 彭 韧<sup>2)</sup> 陈海英<sup>3)</sup> 于金辉<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

<sup>2)</sup>(浙江大学计算机科学与技术学院 杭州 310027)

<sup>3)</sup>(浙江大学数字图书馆研究中心 杭州 310027)

(tuchuanpeng@cad.zju.edu.cn)

**摘 要** 针对手工制作剪纸风格流水动画极其费工、费时的问题,提出一种用计算机手段生成剪纸风格流水动画的方法。首先对手工剪纸中的流水纹样进行分类,构建它们的静态结构模型,并对于各种类型的水波纹建立不同的动态控制机制;在生成流水动画时,对各种波纹在时空上进行有机组合,包括浪花纹在流水波纹上的出现位置与动态控制,以及在有移动物体情况下物体和水面交界处各种纹样的控制。采用文中系统,用户只需进行少量交互确定流水波纹的位置,便能生成运动流畅的剪纸风格流水动画。最后给出了平稳水波、激烈水波以及水上移动物体与水面相交流水波纹的动画图例。

**关键词** 剪纸; 流水; 纹样; 模型; 非真实感绘制; 动画  
**中图分类号** TP391

## Computer Generation of Water Animation with the Style of Paper-Cuts

Tu Chuanpeng<sup>1)</sup> Peng Ren<sup>2)</sup> Chen Haiying<sup>3)</sup> Yu Jinhui<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

<sup>2)</sup>(School of Computer Science & Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

<sup>3)</sup>(Digital Library R&D Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Generation of water animation with the style of paper-cuts by hand is a laborious task. In this paper a method is proposed for generating water animation with some patterns that emulate the style of hand-made paper-cuts. By the method, first we classify the hand-made paper-cut water patterns into different types, and then construct their models as well as dynamic control mechanisms corresponding to various patterns. During the phase of animation, we arrange various water patterns in space and time, including spray patterns appearing on water wave patterns and those surrounding moving objects on the water surface. With our system, users only need to specify positions of some wave patterns to generate smooth water animations with the style of paper-cuts. Examples are also given in the paper to show the validity of the method.

**Key words** paper-cuts; water; pattern; model; non-photorealistic rendering; animation

剪纸是我国最富有特色的一种民间艺术,中国 作动画并取得巨大成功,剪纸动画与水墨动画一起  
动画艺术家在 20 世纪 50 年代就尝试用剪纸风格制 在国际动画节被誉为中国学派。然而手工剪纸动画

收稿日期:2008-08-08;修回日期:2009-01-07。基金项目:国家自然科学基金(60673007);国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA01Z312);国家科技支撑计划课题(2007BAH11B02);浙江省科技计划项目(2007C21043)。涂传朋,男,1984年生,硕士,主要研究方向为非真实感绘制。彭 韧,男,1965年生,学士,副教授,主要研究方向为数字化艺术设计(pengren@cs.zju.edu.cn)。陈海英,女,1962年生,学士,副教授,主要研究方向为信息处理与信息检索。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)。

造价昂贵,制作周期长,我国已有近20年时间没有生产剪纸动画.手工制作剪纸动画时,艺术家先把人物分解为头、身躯、上肢、下肢、手、脚等若干部分,然后在每个部分上刻出一些剪纸纹样,最后把各个部分组合起来.若要表现动画角色的动作,需要有经验的艺术家非常细心地、慢慢地通过手工调整各个部分的移动,以保证动作的流畅.

还有一些自然运动物体,如流水,在手工制作剪纸动画中一般都设法避免制作它们的动画.因为剪纸风格的水纹形状复杂,若要保证这些复杂的水纹形状运动流畅,就需要剪出很多复杂的、在时间上高度相关的一系列水纹,而这用手工剪纸几乎无法实现.在现有的剪纸动画中,艺术家先画出若干个带有流水纹的硬纸片,然后通过交叉运动这些纸片来简单模拟水的运动,在视觉效果上显得呆板、僵硬.

近几年一些学者开始关注计算机生成剪纸效果感兴趣.张显全等<sup>[1-2]</sup>首先对动物剪纸纹样进行计算机建模,包括五官纹、表现动物皮毛的锯齿纹以及其他一些装饰纹,然后构造一些动物剪纸形象.Liu等<sup>[3]</sup>通过对手工经几次对折后剪出的圆形剪纸图案进行分析,找到不同射线方向上的对称轴(即手工把纸对折几次后形成的折叠轴),把圆形剪纸图案分解成若干扇形,然后再合成新的对称式剪纸图案.Li等<sup>[4-5]</sup>构建了一个三维剪纸效果生成系统,通过设计

一些交互工具把一些矢量化剪纸纹样模型贴到三维模型上,并在模型表面镂空这些纹样生成三维剪纸效果<sup>[6]</sup>;再利用骨架驱动技术把这些带有镂空剪纸纹样的三维模型(人物或动物)运动起来.Xu等<sup>[7]</sup>用多门限对图像进行二值化处理,然后对一些区域进行连接以模拟手工剪纸中纹样之间的连通效果.

目前尚未发现对剪纸流水纹进行建模的报道.本文提出一种计算机生成剪纸风格流水动画的方法.首先对手工剪纸水纹进行分类,包括平稳流水波纹、浪花纹等,构建出它们的静态结构,在动态控制方面也根据不同类型的波纹建立不同的控制机制;在生成流水动画时,对不同波纹在时空上进行有机组合,包括浪花纹在流水波纹上的出现位置与动态控制,以及在有移动物体(如船只在水面行走)情况下物体和水面交界处各种纹样的控制.最后给出采用本文方法实现的一些剪纸风格流水动画例子.

## 1 剪纸风格流水纹形状建模

图1所示为2幅手工剪纸作品,图1a用于表现湖面等;图1b中包括2个部分:表现水面的横向波浪水纹和激起的浪花纹,以及用于表现有一定运动速度的河流等.下面将详细介绍这些水波纹的建模过程.

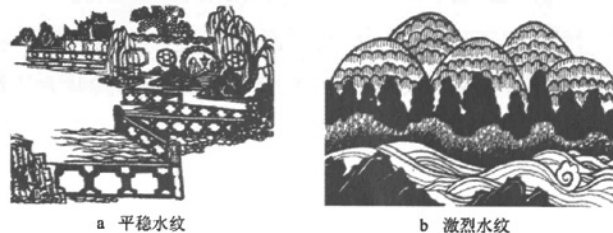


图1 手工剪纸作品中的水纹

### 1.1 横向水波纹

图1a所示的平稳水波纹和图1b所示的横向水波纹在形状上类似于正弦波,对于其中一条横向水纹 $W_H$ ,可用正弦波对其进行建模

$$W_H(u) = (A + \Delta)\sin((\omega + \Delta)u + \Delta) \quad (1)$$

其中 $u$ 为归一化横向世界坐标.为了避免由正弦波幅度和周期一致带来的机械感,本文在正弦波的幅度 $A$ 和角频率 $\omega$ 上加入微小随机扰动 $\Delta$ ,用于模拟手工剪纸的效果.在正弦波中加入的相位随机扰动是为了使不同横向水波纹在波峰波谷之间错落开,避免因整齐带来的机械感.

### 1.2 浪花纹

浪花纹在总体上呈现螺旋线状,如图1b所示,与单纯螺旋线不同,它在螺旋线上某一段是由若干短弧构成的.本文在螺旋线上添加外摆线来对其建模,其中螺旋线的直角坐标系方程为

$$\begin{cases} x = -a\theta\cos\theta, \\ y = a\theta\sin\theta, \end{cases} \quad \theta \in (\theta_1, \theta_2) \quad (2)$$

其中, $a$ 用于控制螺旋线向外增长的快慢(即控制浪花纹的大小), $\theta$ 为角度.为了生成与图1b方向一致的浪花,我们在式(2)中 $x$ 分量上添加一个负号. $a$ 的大小根据场景需要确定, $\theta$ 取值范围一般在

$(0 \sim 4.5)\pi$  之间,如图 2 中红色曲线所示,其端点分别对应  $P_0$  和  $P_3$  点。

有了螺旋线骨架后,可在其上加入几条外摆线

$$\begin{cases} x = (a + b_i) \cos \theta - b_i * \cos [(a + b_i)\theta/b_i], \\ y = (a + b_i) \sin \theta - b_i * \sin [(a + b_i)\theta/b_i], \\ i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\theta$  取值范围一般在  $2\pi \sim 3.25\pi$  之间(在图 2 分别对应  $P_1$  和  $P_2$  点);  $n$  为外摆圆个数,在系统中随机取 4 或 5;  $b_i$  为螺旋线上第  $i$  个外摆圆半径,且  $b_i = b \cdot (0.7 + 0.3 \sin(i\pi/n))$ ,  $b$  为外摆圆最大的半径,如图 2 中蓝色曲线所示。

除了上述螺旋线形态外,浪花纹还有个尾部曲线用于和横向水波纹的衔接。如果  $P_2$  是外摆线部分的最后一个采样点,  $P_5$  点位于浪花中心  $P_0$  点左方,两者相距  $d$ ; 则获得  $P_3, P_4$  的方法如下:通过 2 个长度系数  $f_1$  和  $f_2$  ( $0 < f_1 < f_2 < 1$ ) 在  $\overline{P_5 P_0}$  (如图 2 中横向绿线所示) 上确定出 2 个点  $P_5 + f_1 \cdot \overline{P_5 P_0}, P_5 + f_2 \cdot \overline{P_5 P_0}$ ; 然后朝  $\overline{P_5 P_0}$  的垂直偏下方,将  $\overline{P_5 P_0}$  上获得的 2 个点通过不同的高度系数  $h$  ( $h < 1$ ) 来确定  $P_3, P_4$  以及  $P_6$  和  $P_7$ ; 最后用样条曲线分别对  $P_4, P_6, P_5$  以及  $P_3, P_7, P_5$  插值得到所希望的浪花尾部衔接曲线,如图 2 中粉色曲线所示。

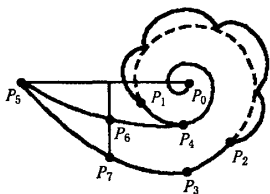


图 2 浪花模型

由于该浪花模型是矢量化的,我们可以对其进行放大/缩小以及旋转处理,以适应流水动画中浪花的动态控制需要。另外,如果以经过  $P_5$  且平行于  $Y$  轴的直线为对称轴,便可得到方向向左的浪花。

## 2 水纹空间位置分布

在表现较为安静的湖面等剪纸作品中,横向水波纹并不是孤立地出现的,而是由若干横向水纹聚集在某些区域,在远处聚集的数量少一些,其长度在整体上短一些,近处数量多一些,长度在整体上长一些,每个略有随机变化。

由于横向水波聚集位置与场景构图有关,本文在系统中提供交互工具,用户可以在场景中画出一

条横线作为横向水波聚集中心参考位置,并输入参数控制横向水波之间的间距  $d_h$  与数量  $n_h$ 。确定一簇参考线的子函数的伪码表示如下:

```
Reflines( $x_1, y_1, l_h, d_h, n_h$ ) {
    簇内每个参考线左端位置坐标为  $x_{t1}, y_{t1}$ , 右端位置坐标为  $x_{t2}, y_{t2}$ ;
     $y_{up} = y_1 - d * n_h / 2$ ; //  $y_{up}$  为簇中最上面一个横向水波参考线的  $y$  坐标;
    for ( $i = 1$  to  $n_h$ ) {
         $x_{t1} = x_1 + \Delta$ ;
         $x_{t2} = x_2 + l_h + \Delta$ ;
         $y_t = y_{up} - i * d_h$ ;
        return( $x_{t1}, x_{t2}, y_t$ );
    }
}
```

其中  $l_h$  为参考线长度,  $\Delta \ll l_h$  为随机扰动。

图 1b 中,其横向长度可以贯穿屏幕,纵向位置仍需根据场景指定。本文采用若干上下平行的正弦状波纹构成一组,其幅度和波峰跨度均比表现较为安静水面的横向水波纹要大;然后用若干组前后叠加构成激烈水波,用 3~5 条平行的正弦曲线拟合每一组水波纹。对于第  $s$  组中的某一条横向水纹  $W_H$  可表达为

$$W_H(u, s) = (A(s) + \Delta A) \sin((\omega(s) + \Delta \omega)u + \varphi(s) + \Delta \varphi) \quad (4)$$

其中,  $u$  为归一化横向世界坐标;在正弦波的幅度  $A(s)$  和角频率  $\omega(s)$  上加入微小随机扰动,同样也是为了避免由正弦波幅度和周期一致而带来的机械感,以更好地模拟手工剪纸的效果;每组正弦波的初相  $\varphi(s)$  的选择应该使不同横向水波纹在波峰波谷之间错落开;加入相位随机扰动  $\Delta \varphi$  也是为了使生成的缓流横向水波纹更接近手工剪纸效果。

浪花纹一般零散地出现在横向水波纹的波谷处,本文用概率控制浪花纹出现的数量和位置。

## 3 剪纸流水纹动态控制

不同的剪纸水波纹依据其表现的场景有不同的动态控制方式。下面分别介绍平稳横向水波纹、激烈横向水波纹以及浪花的动态控制方式。

### 3.1 平稳横向水波纹

对于表现较为安静湖面上的平稳横向水波纹,由于其没有明显的流动方向,各个横向水波纹只是在各自横向参考线上随时间改变其波动幅度以及水波长度,系统在计算出每个横向参考线位置坐标

参数 $(x_{t_1}, x_{t_2}, y_t)$ 后,只需随时间更新调用如下子函数

```
DrawHriztlWavePattern(xt1, xt2, yt) {
    u = (x - x1) / l; // x1 ≤ x ≤ x2
    W(u) = x1 + (A + Δ) sin((ω + Δ)u + Δ);
}
```

即可画出横向水波的荡漾效果.这里的关键是波形函数 $W(u)$ 中的扰动分量 $\Delta$ 使得水波幅度与波峰/波谷随时间随机变化.

### 3.2 激烈横向水波纹

如图1b所示,对于横向贯穿屏幕的激烈横向水波纹有明显的运动方向,可以把它们的运动方向定义为从左到右(也可以从右到左).以每组为单位,各组之间的波峰与波谷之间错开.在生成动画时,各组横向水波按照给定速度向画面右方移动,同时在各组波峰和波谷加入随机扰动,以避免水波运动的机械感.

在一组内的单条水纹的运动可以描述为

$$W_H(u, s) = (A(s) + \Delta A) \sin((\omega(s) + \Delta\omega)(u + t \times \text{speed}) + \varphi(s) + \Delta\varphi) \quad (5)$$

与式(4)相比,在式(5)中增加了时间 $t$ , $\text{speed}$ 为缓流水流速度,其他变量含义与式(4)中所表达的含义相同.

### 3.3 浪花纹

浪花纹的动态控制分为2个部分:一部分是在某个横向水波上的位置分布;另一部分是动态变化,一旦每个浪花出现位置确定后,浪花开始从小变大,大到一定程度后再开始变小,如此构成一个生命变化周期.可用函数

$$f_i = a + (1 - a) \sin(i \times \pi / m), \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

实现对浪花的大小控制.其中, $i$ 对应画面指数; $a$ 控制浪花最小时的大小,其缺省值设为0.3,用户可以通过系统界面调控其大小以获得希望的效果;根据实验,浪花生命变化周期 $m$ 取5幅画面对应长度能得到较好的视觉效果.

综上所述,浪花的动态控制过程可以用伪码表示如下:

```
//初始化
对每组浪花纹样 {
    确定浪花数量;
    对每个浪花纹样 { 确定该浪花纹样位置; }
}
//开始
对于动画中每幅画面 {
    对于每个浪花纹样 {
        如果浪花纹样的生命变化周期结束,则 {
            计算一个新的浪花纹样位置;
            检查当前浪花纹样的生命指数;
            根据生命指数计算缩放系数;
            缩放浪花纹样;
            放置缩放的浪花纹样到其位置上. }
        }
    }
}
```

## 4 移动物体和水波纹的关联控制

如果在运动水波纹中还有移动物体,则在移动物体和水面之间会有激起的浪花.以水中运动的船舶为例,我们通过在系统中检测船舶前端、侧面以及后方和水波相交的位置,并在这些相交地方添加若干浪花,每个浪花的出现时间随机控制,一旦出现浪花则按生命变化周期控制其大小变化.在数量上,船舶前端浪花多一些,侧面和后面的浪花少一些.

## 5 动画结果实例

本文系统是在 Pentium 2.4 GHz CPU, 512 MB 内存, NVIDIA 5700 显卡, Window XP 操作系统下实现的,开发软件为 Visual C++.net 2005.图3所示为平稳水波荡漾动画中的2幅画面,其场景中的



图3 剪纸风格荡漾纹波

静止物体为手工剪纸作品,水面上荡漾的纹波为采用本文系统生成。

图 4 所示为激烈横向流水与运动物体船舶之间相互作用动画中的 4 幅画面,场景中的山峦、树木以及岩石均取自手工剪纸作品,画面中的横向水波、激

起浪花为采用本文系统生成,船舶是通过控制点生成的矢量化模型,在船舶运行过程中系统实时检测船舶前方、侧面以及后方同横向水波相交并添加浪花。为了夸张水流的激烈程度,我们在动画中把船舶进行摇摆。

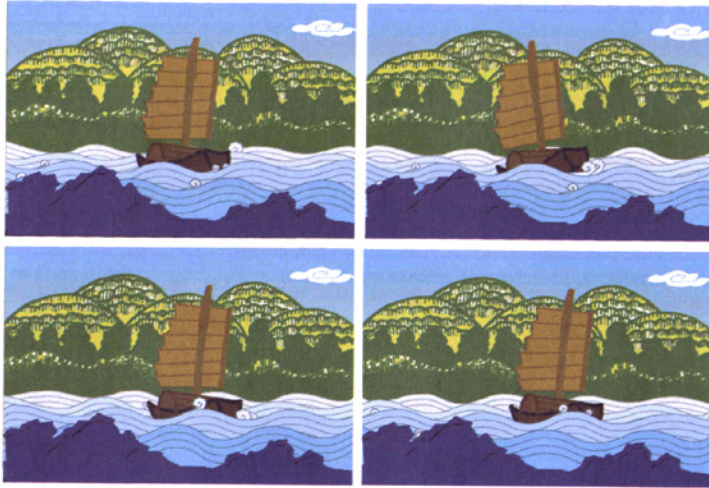


图 4 船舶在激烈横向流水中运动

## 6 总结与未来工作展望

本文提出一种构建剪纸中常见的流水波纹模型以及它们的动态控制方法,用该方法生成的剪纸风格流水动画在视觉效果上自然、流畅。本文工作使得手工剪纸动画中几乎不能实现的流水动画变为通过用户少量交互就可以生成,这对制作剪纸动画有非常重要的意义。

需要指出的是,由于我们的目标仅在于模拟剪纸风格的流水动画,所以在建模过程中并没有严格考虑手工剪纸中为了保证不同剪纸纹样之间的连通性而特意加上去的短线,因为加上这些连通短线会在一定程度上破坏流水的动态流畅效果。在今后的研究工作中,我们将对其他剪纸风格特效动画进行建模,如云彩、火焰、烟雾等。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Xianquan, Yu Jinhui, Jiang Linglin, *et al.* Computer assisted generation of paper cut-out images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17 (6): 1378-1382 (in Chinese)
- [2] Zhang Xianquan, Yu Jinhui, Jiang Linglin, *et al.* Computer paper cut-out system based on decorative pattern [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(11): 248-250 (in Chinese) (张显全,于金辉,蒋凌琳,等.基于纹样的计算机剪纸系统[J].*计算机工程*,2006,32(11):248-250)
- [3] Liu Y X, Hays J, Xu Y Q, *et al.* Digital papercutting [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, 2005, Article No. 99*
- [4] Li Y, Yu J H, Shi J Y. 3D Paper-cut modeling and animation [J]. *The Journal of Computer Animation and Social Agent*, 2007, 18 (4/5): 395-404
- [5] Li Y, Yu J H, Zhang H X, *et al.* Generating 3D paper-cutting effects [M] // *Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2006, 3942: 1062-1065*
- [6] Li Yan, Yu J H, Shi J Y. A 3D paper-cutting oriented mesh trimming algorithm [J]. *Journal of Software*, 2006, 17 (Suppl): 169-175 (in Chinese) (李岩,于金辉,石教英.面向三维剪纸的网格模型切割方法[J].*软件学报*,2006,17(增刊):169-175)
- [7] Xu J, Craig K, Mi X F. Computer-generated papercutting [C] // *Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Hawaii, 2008: 343-350*