

# 计算机生成三维卡通风格喷水效果

于金辉 陈海英 彭群生

(浙江大学 CAD/CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

Email: [jhyu@cad.zju.edu.cn](mailto:jhyu@cad.zju.edu.cn)

<http://www.cad.zju.edu.cn/home/jhyu>

摘要：在过去二十年中人们提出许多处理水运动的模型，但大都致力于生成真实感的动画，而对传统手工绘制的水运动效果建模问题几乎无人涉及。本文给出一个自动生成三维卡通风格喷水效果的计算机模型。我们首先介绍如何从手工绘制的卡通喷水画面中提取它的骨架，然后沿骨架用等级结构定义喷水边线、水波纹理与水滴。通过引进随机分量控制，本模型可以自动生成无重复机械感的并与卡通风格一致的喷水序列画面。此外文中还给出了生成三维卡通风格喷水的方法以及相应的动画图例。

关键词：卡通动画，喷水，计算机动画

## 1. 引言

在卡通动画中火焰、烟雾、水等效果（英语统称为 Effects）对烘托动画气氛及增强动画的真实感都有十分重要的作用，其中喷水效果是动画中常见的场景，例如田地或花草地的喷水浇灌设施，城市路面洒水车，消防人员用的喷水枪以及常用的水龙头等，它们在使用时由内部压力而形成水的喷射。迪斯尼动画中也经常采用长长的弯曲软管突然喷水以获得吸引人的滑稽效果。一般而言，在上述不同场合下喷水的角度以及跨度都不同，若采用人工方式制作这些喷水效果，动画绘制人员需要分别绘制出不同的喷水动画序列，从而增加人工、材料、时间和资金的开销。如果采用计算机模型我们就可以通过调整少量参数来自动生成上述各种喷水效果，从而节约大量的人工、材料、时间和资金。

目前计算机辅助制作动画系统主要着眼于用计算机手段实现传统手工动画中某些制作步骤，其主要的算法是关键画面（Keyframe）插值。但这些自动生成中间画面的方法要求关键画面之间的物体在几何与时间上都连续。由于卡通喷水含有随机运动分量，它破坏了画面之间的对应关系，因而造成上述方法完全失效。此外，卡通喷水是手工绘制的具有艺术风格的二维画面，它们难以用粒子系统[8]表示，我们亦无法利用物理知识如流体理论等对其建立模型。在过去二十年中人们提出许多处理水运动的模型[1-9]，但大都致力于生成真实感的动画，而对自动生成卡通风格水运动效果则一直无人提出有效的解决方法。

虽然卡通 Effects 含有随机运动分量，但它们是自然现象的艺术再现，因而它们的运动是连续并可预测的，所以有可能找出对应的模型来自动生成卡通 Effects。我们已成功地建立了卡通火焰模型[12]、卡通烟雾模型[13]和卡通流水模型[14,15]。由于卡通喷水在形态上以及运动方式上都不同于这些卡通效果，所以我们对手工绘制的卡通喷水进行分析并提取它的骨架，然后在此基础上构造一个等级结构的计算机卡通喷水模型。在文中我们还给出如何生成三维卡通喷水效果的方法以及相应的动画图例。

## 2. 手工绘制的卡通喷水

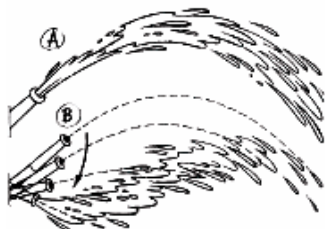


图 1 手工绘制的卡通喷水



图 2 喷水骨架与边线

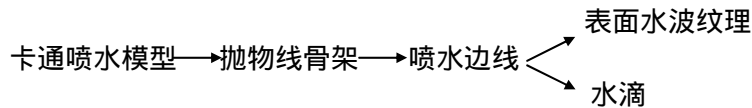
本课题得到国家自然科学基金（60073024）及留学回国人员科研启动基金资助。

作者简介：于金辉，男，博士，研究员。研究方向包括计算机辅助制作卡通动画，非真实感绘制技术，物体变形技术，计算机生成装饰物体，计算机书法，卡通 EFFECTS 自动生成系统等。

水在压力下可以具有很大的力量，在此压力作用下，如果一个喷头以某角度向上指，喷出的水在重力的作用下在空中呈现出抛物线的形状，图 1 给出一幅手工绘制的喷水动画画面[10]。进一步观察该图我们可以发现喷出的水沿抛物线轨迹逐渐变宽并分裂成越来越多的孤立水滴，同时喷水还有可能随着喷头的运动而运动，见图 1 中的(b)。

### 3. 计算机卡通喷水模型

通过上述分析，我们可以把喷水分解成抛物线骨架、喷水边线、喷水表面水波纹理以及水滴几部分来构成喷水模型，其结构如下：



我们对各部分再引入动态控制生成卡通喷水效果，下面我们对它们逐一进行详细介绍。

#### 3.1 抛物线骨架

抛物线骨架用来近似喷水的运动轨迹。我们可以用手工指定少量控制点  $Psklt\_i$  ( $i=1, \dots, Nsklt$ ,  $Nsklt$  为控制点的数量) 来确定骨架的位置和大致形状，再用样条曲线对这些控制点插值得到骨架的数据点  $Sklt\_i$  ( $i=1, \dots, Nsklt$ ,  $Nsklt$  为插值后骨架上点的数量)，如图 2 中折线所示。我们也可以直接通过抛物线方程  $x^2 = -2py$  计算出骨架曲线，这样做的优点是计算出来的骨架形状准确，但其参数的控制不直观。例如，为了使抛物线一端能与喷头角度相一致，我们往往需要试验多次才能找到合适的  $p$  值来生成相应的抛物线。用手工指定控制点方法生成的抛物线骨架其形状不如用方程计算出来的准确，但该方法直观，我们可以按照喷头的角度直接指定控制点。

对于喷头运动引起喷水轨迹运动的情况，我们可以指定两组控制点  $Pskl(t_1)_i$  和  $Pskl(t_2)_i$ ，一组确定喷水轨迹在  $t_1$  时的位置，另一组确定喷水轨迹在  $t_2$  时的位置，然后对两组控制点进行插值来生成若干中间控制点位置，以表示喷水轨迹的运动过程。当然我们也可以通过改变抛物线方程中的参数来控制喷水的运动轨迹，但这样仍然存在寻找合适  $p$  值的问题。

#### 3.2 喷水边线

喷水边线用来控制喷水在空中所占的区域。实际上我们可以把喷水想象成沿抛物线骨架为中心，其半径逐渐变大的圆柱。在二维情况下，我们用  $Jw1$  和  $Jw2$  分别控制喷水在喷头端与远离喷头端的宽度，然后用简单的线性模型生成喷水的两个边线  $BdLine\_i$  与  $BdLine2\_i$  ( $i=1, \dots, NBd=Nsklt$ ，即  $NBd$  与骨架曲线上的点数相同)，如图 2 中实线所示。由于喷水的运动是通过边线上点的位移来实现的，所以在骨架相邻控制点之间插值点的数量应该足够多以保证喷水波运动的连续性。在系统中我们把插值点数的缺省值设为 10 供观查初始效果用，然后用户根据需要再决定是否修正该参量。

#### 3.3 水波纹理形状生成及动态控制

喷水在沿抛物线轨迹运动过程中在水表面形成水波纹理，我们在不同画面中把它们画在不同的位置上就可以表现喷水沿骨架轨迹的运动。水波纹理的具体形状则是用沿喷水运动前方凸出的曲线所做的骨架上画出若干水滴构成（水滴的生成方法在 3.4 节中详细介绍），如图 3 所示。在这里骨架曲线可以用正弦函数横跨喷水两边线构成，其幅度用随机函数控制。靠近喷头的一些短线用来表现刚出喷头的水快速运动效果。在模型中我们利用喷头边线的数据来限制短线的位置，其数量、长短以及方向均用随机函数控制。

水波纹理在喷水(柱)上的分布用参数  $Wdis$  进行控制。 $Wdis$  实际上表示边线上的一些点数，比如从  $BdLine1\_i$  到  $BdLine1\_(i+Wdis)$  之间的点数。

水波纹理运动的速度用参数  $Wspd$  进行控制。与  $Wdis$  类似，在模型中  $Wspd$  要转化成边线上的一些点数来控制水波在两相邻画面之间的沿边线的位移，例如把  $Wspd$  指定为 3，则水波从某画面到其下一个画面沿边线移动三个点的距离。



图 3 水波纹理

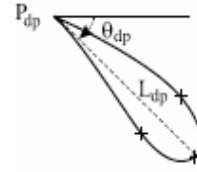


图 4 水滴

注意，由于  $Wdis$  与  $Wspd$  都是边线上的点数，为了在动画中避免水波纹理向后移动的频闪效应<sup>1</sup>，二者需满足如下关系：

$$Wdis > 3Wspd \quad (1)$$

利用边线上的点数  $NBd$  与参数  $Wdis$ ，水波纹理的数量  $WNum$  则可以通过如下方程计算得出：

$$WNum = NBd / Wdis \quad (2)$$

### 3.4 水滴形状生成及分布控制

当喷水从喷头向外运动时，水逐渐分裂成孤立的水滴，离喷头越远，所分裂的水滴越多，水滴的长度也相应变长。为了描绘一个具体水滴形状，我们采用四个参数构建水滴模型：位置  $Pdp$ 、角度  $\theta dp$ 、长度  $Ldp$  以及水滴最宽处的宽度  $Wdp$ 。

对于每个水滴，模型先通过边线数据点计算出它的位置参数，然后用离该位置最近边线上两相邻数据点的  $(x,y)$  坐标值计算出其反正切得出水滴的角度值  $\theta dp$ ，这样就能保证生成的水滴角度与其接近的喷水段角度一致。水滴长度是根据事先指定的均值及变化规律计算出来，水滴最宽处的控制点则放置在水滴前端 0.3~0.4 处。 $Wdp$  根据我们的实验取其长度  $Ldp$  的十分之一左右可以获得较好的水滴形状。用上述四个参数我们很容易计算出少量几个控制点(如图 4 中的“+”所示)的位置，然后再用样条曲线对这些控制点插值来获得水滴的最终形状。需要指出，这里所有的参数，包括水滴最宽处控制点的位置都用随机函数控制，以避免生成具有同一形状的水滴而在动画中造成机械的感觉。

在上述的水滴模型中我们进一步设置一个  $open$  标记(flag)，当它为 0 时，位于水滴尖端的两个控制点重合生成一个封闭的水滴形状，用来表现与喷水分裂的孤立水滴。当它为 1 时，这两个控制点则分开一点生成一个开口的水滴，加到正弦形水波纹理骨架上表现水波纹理的形状。

对于分裂的孤立水滴，其分布用定义在抛物线骨架  $Psklt(u)$  上的位置参数  $u$ ，( $0 \leq u \leq 1$ ， $Psklt(0)$  对应于喷头端， $Psklt(1)$  对应于远离喷头端的)线性函数来控制，即当  $u$  逐渐增大时水滴数量逐渐增多，且分布位置从喷水边线内逐渐扩展到边线外，对每个水滴的具体位置也加入随机扰动使得喷水效果总体看起来更自然。

## 4 模型结构

综上所述，我们的卡通喷水模型可以构成如下：

- (1) 输入模型初始化参数：
    - a. 根据动画脚本指定少量控制点  $Psklt(t)_i$ ，( $i=1, \dots, Nsklt$ );
    - b.  $Wdis$ ，水波纹理间距；
    - c.  $Wspd$ ，水波速度；
  - (2) 计算水波纹理数量： $WNum = NBd / Wdis$ ；
  - (3) 对  $Psklt(t)_i$  进行样条曲线插值生成抛物线骨架  $Sklt_i$ ，( $i=1, \dots, Nsklt$ )；
  - (4) 计算两个边线数据  $BdLine1_i$  和  $BdLine2_i$ ，( $i=1, \dots, NBd$ );
- For each Frame\_t
- a. 在近喷口处画少量短线；
  - b. 以两边线对应点  $BdLine1_{(i+Wspd)}$  和  $BdLine2_{(i+Wspd)}$  作为端点生成  $Wnum$  个水波纹理骨架；

<sup>1</sup> 频闪效应是电影在播放过程中的一种视觉效应，常见的有快速旋转的车轮有时看起来好象朝反方向慢速旋转似的。

- c. 添加若干开口水滴到水波纹理骨架上；
  - d. 在喷水边线内外随机生成若干孤立水滴；
- End of each frame

## 5 三维卡通喷水

该模型的等级结构使得我们很容易在三维空间生成卡通风格的喷水效果。在具体实现中我们采用了一种二维与三维相结合的混合控制方法，其思想是对模型的最高层—抛物线骨架—进行三维控制，其余部分仍用二维的控制方法，如下：

1. 在三维空间指定控制点并在三维空间中对它们进行样条曲线插值获得三维骨架；
2. 把该三维骨架投影到二维平面上；
3. 基于上述投影的二维骨架，利用原来的模型直接在二维平面上生成喷水的其它部分如水波纹理、水滴等。

由于避免了隐线、隐面消除等耗时计算，这种混合控制的模型速度非常快。该模型的缺点是缺乏三维喷水的体积信息，因而不能表现一些具有特殊角度（比如喷水与显示屏幕垂直）的喷水效果。尽管如此，这在动画中并不是一个严重的问题，因为从表现角度而言动画中常常用侧面的喷水以使观众看得更清楚。图 5 和图 6 给出本模型自动生成动画序列中的两幅画面，图 7 是按一定时间间隔在动画序列中取出的 8 幅画面，从上面 4 幅画面可大致看出喷头角度逐渐升高的喷水过程，下面 4 幅则表现喷水从右到左横向移动的喷水过程（相应的动画文件可以从作者主页<http://www.cad.zju.edu.cn/home/jhyu/Effects.htm> 下载观看）。

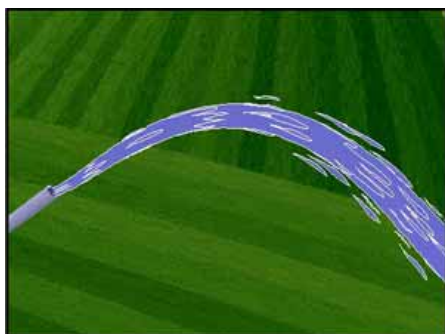


图 5 三维卡通喷水效果图 1



图 6 三维卡通喷水效果图 2

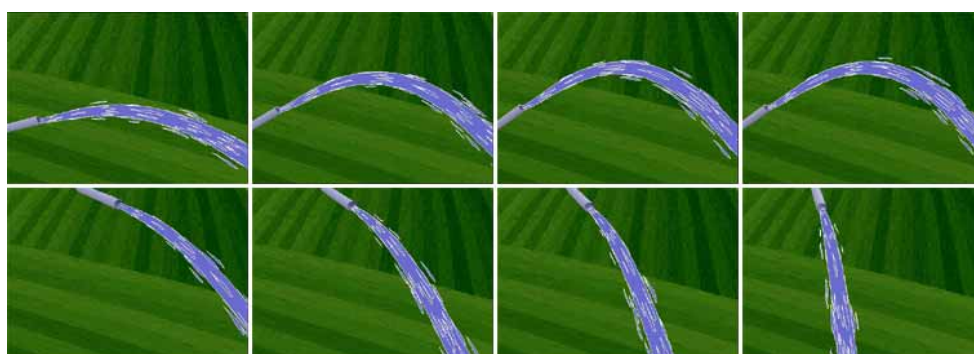


图 7 三维卡通喷水效果动画序列

## 6 结束语

本文给出一个自动生成卡通风格的喷水模型。与手工绘制的喷水效果相比它有如下几个优点：

- (1) 由于在模型中我们采用了随机分量控制，因而在生成的喷水效果中避免了手工绘制动画里重复使用周期序列画面带来的机械感。

(2) 我们的模型不仅能再现传统二维卡通喷水效果,它还能在三维空间生成卡通风格的喷水动画。这是一个具有十分重要意义的结果,因为用手工画出具有准确透视关系的三维卡通动画是极其困难的。

(3) 由于模型具有等级结构,我们只需对抛物线骨架位置进行控制便可以生成角度变化的卡通喷水效果以适应动画脚本的不同要求,从而避免分别画出不同喷水动画序列的手工劳动。

### 参考文献

- [1] Perlin. K, An image synthesiser, [J]. Computer Graphics, 1985,19: 287-286.
- [2] Max. NL, Vectorised procedural models for natural terrain: Waves and island in the sunset, [J]. Computer Graphics, 1981, 15: 317-324.
- [3] Peachey. DR, Modeling waves and surf, [J]. Computer Graphics, 1986,19: 65-74.
- [4] Fournier. A and Reeves. W.T, A simple model of ocean waves, [J]. Computer Graphics, 1986, 20: 75-84.
- [5] Watterberg. P.A, Mastin. G.A and Mareda. J.F, Fournier synthesis of ocean scenes, [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987,7: 16-23.
- [6] Sims. K, Particle animation and rendering using data parallel computation, [J]. Computer Graphics, [J]. 1990,24: 405-413.
- [7] Mallinder. H, The modeling of large waterfalls using string texture, Visualization and Computer Animation, 1995,6: 3-10.
- [8] Reeves. W.T, Particle system-a technique for modeling a class of fussy objects, [J]. Computer Graphics, 1983, 17: 358-376.
- [9] 徐迎庆, 苏成, 李华等, 基于物理模型的流水及波浪模拟, [J]. 计算机学报, 1996,19(增刊), 153-159.
- [10] White. T, The Animator's book, [M]. New York, Watson-Guptill, , 1986.
- [11] Harold. W, Timing for Animation. [M]. London, Focal Press Limited, 1981.
- [12] Yu. Jinhui & Patterson. J.W, A fire model for 2D computer animation, Computer Animation and Simulation'96, [C]. New York, Spriger-Verlag, 1996, 49-60.
- [13] 于金辉, 徐晓刚, 彭群生, 计算机生成卡通烟雾动画, [J]. 计算机学报, 2000, 23 : 987-990.
- [14] 于金辉, 徐晓刚, 彭群生, 用随机正弦波拟合卡通流水, 计算机研究与发展, 2001, 38(5), 519-523.
- [15] Yu Jinhui, Xu Xiaogang, Wan Huagen, Peng Qunsheng, A Cartoon Water Model for Stereo Animation, Journal of Software, 2001,12(7):950-966.

## Computer Generation of 3D Cartoon Water Jet

Yu Jinhui Chen Haiying Peng Qunsheng

(State Key Lab. of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract** Many models for dealing with water effects have been proposed in the past two decades, most of them however aimed at generating realistic water images and little effort has been spent on modeling cartoon water effects. This paper presents a model capable of generate cartoon water jet in a procedural manner. We show how to abstract the skeleton for water jet from hand-drawn series and, based on this skeleton, reproduce wave textures and drops with hierarchical models. By stochastically varying the parameters, the model is able to generate the water jet effect automatically with the look of traditional cartoon. Furthermore, the paper also gives a method to show how to extend the water jet effect from 2D to 3D and relevant examples are given simultaneously.

**Keywords** cartoon animation, water jet, computer animation.