

计算机生成三维卡通溅水效果

廖菁, 于金辉*

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

(liaojing@cad.zju.edu.cn)

摘要: 针对手工绘制卡通溅水效果费时费力的问题, 提出一个计算机自动生成的三维卡通溅水模型. 首先构建溅水喇叭形曲面的母线方程, 然后旋转得到溅水曲面, 再根据手工绘制溅水的形状特征构建溅水的动态纹理并映射到溅水曲面上; 空中零散水花则用少量控制点和样条曲线拟合其形状, 然后分类布置在溅水曲面周围并用 Billboard 技术绘制各个水花. 实验结果表明, 采用文中模型生成的卡通溅水动画不仅保持了手工绘画的艺术感, 还把卡通溅水扩展到三维空间, 并能够通过调整参数控制溅水效果的激烈程度.

关键词: 溅水; 模型; 卡通动画; 计算机动画

中图分类号: TP391

Computer Generation of 3D Cartoon Splash

Liao Jing and Yu Jinhui*

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

Abstract: Animating splash effects is a time-consuming task in cartoon. We present a model for automatic generation of 3D cartoon splash. First, we construct a parabolic curve and use it to form a surface as the underlying model of the splash, then we model dynamic textures for the splash with the spline based on the features of hand-drawn water splash. As for spray forms surrounding the splash surface, we model them with a few control points and interpolate them with the spline according to their shapes. Spray forms of varying shapes are finally rendered on the billboard distributed around the water splash. Our method extends the splash animation to 3D space while retaining the style of hand-drawn cartoon. Moreover, our model allows high-level parametric control over the splash effect animations that change from gentle to violent.

Key words: water splash; modeling; cartoon animation; computer animation

水在自然界中分布非常广泛, 大到江河湖海, 小到滴水涟漪, 在卡通动画中常需要画出各种水的效果来烘托动画气氛并增强动画的真实感. 水在不同外界条件下(如流速、风力以及障碍物等)还会呈现出多种形态, 其中最典型的就是在物体落入水中后会产生一个溅水过程. 然而, 利用传统的手工绘制方法产生卡通溅水效果的效率很低, 一般有经验的动画师每天只能画 30~50 幅画面. 如果能利用计算机

自动生成卡通溅水动画, 则可以大大提高生产效率, 降低制作成本.

在过去的 30 年中, 人们大多致力于研究真实感水的计算机模拟, Iglesias^[1] 和 Adabala 等^[2] 分别以时间和类型为主线对真实感水动画的模型构建以及渲染等方面的技术进行了详细综述. 如今真实感水模拟技术已在电影特效中大量使用, 几乎可达到以假乱真的效果. 然而在卡通动画中水的形状和动态

收稿日期: 2010-07-06; 修回日期: 2010-09-02. 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60933007); 国家科技支撑计划(2007BAH11B02).
廖菁(1985—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为计算机图形学、计算机动画; 于金辉(1960—), 男, 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图形学、计算机动画、数字艺术(jhyu@cad.zju.edu.cn).

都进行了艺术简化和夸张,真实感水的模拟方法很难融合这类简化和夸张。

与真实感水生成技术相比,非真实感水生成技术只有 10 年历史,它们可以分为如下 3 类:

1) 基于物理模型的方法. Witting^[3] 利用简化的二维 Navier-Stokes 方程计算流体动态,模拟出卡通动画中雾气流动以及碗中水运动的效果;Eden 等^[4] 利用一个三维环境下的物理流体模型生成水面,并在此基础上加上线条、色块、纹理等实现卡通风格. 这类方法主要通过绘制实现流体风格化,但流体的动态仍然是真实感的。

2) 基于粒子系统的方法. Di Fiore 等^[5] 提出一个基于粒子的喷水模型,它可由用户控制粒子的运动轨迹,Thornton^[6] 提出基于粒子系统构建的卡通溅水模型,粒子发射点和运动属性根据手绘卡通溅水设定. 采用这 2 种基于粒子系统建模的方法生成的卡通水动画在动态上是风格化的,但在外观上具有强烈的粒子感觉,与卡通水在外观上相距较远。

3) 过程式建模的方法. 其主要思想是构建一些矢量化了的卡通水形状,然后用等级结构模型控制不同形状的运动. 如于金辉等利用梯形结构建立卡通流水模型^[7-9],并将其扩展到不同透视情况和激烈流水^[10],进而扩展到利用网格处理流水中有障碍物的

情况^[11]. 于金辉等还提出了其他水效果的过程式模型,如卡通喷水效果^[9,12]、卡通涟漪及波光闪烁效果^[9,13]和三维卡通水与物体交互作用的效果^[14]. 这类方法能够较好地保持手工绘画的特征,并且动画形态在一定程度上可用参数调控。

以上非真实感水的相关工作中,只有文献[14]中的一个溅水例子与本文的工作近似. 在该例子中,采用直线旋转而成的锥面和柱面作为溅水上升和下降阶段的基曲面,其缺点是溅水基曲面不能像手工绘制的溅水曲面那样弯曲和改变张角,因此生成的溅水动画显得僵硬. 此外,该溅水模型没有采用可控的参数来调整溅水的外形、动态、激烈程度等. 本文提出一个新的三维卡通溅水的过程式模型,它建立在三维空间,允许视角变化,而且更加符合手工绘制溅水的特点,还能够通过调整参数改变溅水的外形和动态,从而实现不同激烈程度的卡通溅水动画。

1 卡通溅水模型结构

图 1 展示了手绘卡通溅水效果,前 3 幅是从一个较轻微的卡通溅水序列中选出的,后 2 幅是更激烈的溅水画面。



图 1 手绘卡通溅水序列

通过仔细观察图 1 可以发现,卡通溅水效果由 3 部分组成:水在溅起过程中会产生一个类似喇叭形的溅水曲面,它随时间逐渐扩大、弯曲并破碎;在溅水四周散布零散的水花;在水面上则产生一圈圈涟漪. 相应地,本文的卡通溅水模型也分别由溅水曲面、零散水花和水面涟漪 3 部分构成,如图 2 所示. 每一部分的模型均采用混合式的三维模型,即首先在三维空间构建喇叭曲面、零散水花对应的 Billboard 和涟漪所在的水平面;然后在二维空间上分别构造它们对应的动态纹理;最后映射回对应的三维曲面或平面上;这 3 个部分在时间和空间上的组合构成最终的溅水效果. 在动态上,溅水可分为上升、下降和结束 3 个阶段. 上升阶段溅水曲面扩大增高,向上抛出零散的水花;下降阶段溅水曲面高度降

低并且分裂,空中的零散水花逐渐下落;在结束阶段溅水曲面已完全消失,只有空中部分零散水花继续下落,和水面荡起的涟漪进一步扩散。

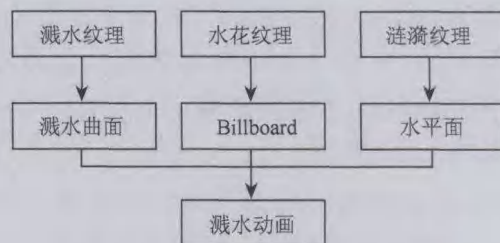


图 2 三维卡通溅水模型结构

2 溅水曲面与溅水纹理

溅水曲面在模型中并不显示,而是作为溅水纹

理的载体.在动画中,曲面和纹理的形状都随时间变化,因此在这部分建模中需要解决曲面和纹理的形状定义以及它们随时间变化的控制问题.

2.1 喇叭曲面

首先以溅水中心参考点 O 作为原点,以垂直水面向上为 Y 轴正方向建立局部柱坐标系 (R, θ, Y) ,再根据落水物体大小决定溅水在水面的底部圆半径 r_1 ,如图 3 a 所示.下面定义喇叭曲面的形状.设喇叭曲面在 $\theta = \pi/2$ 的平面上相交得到一曲线,由于可将溅水曲面看成由无数小水滴组成,因此我们把该曲线看成是一个小水滴的运动轨迹.每个小水滴在初

速度 v_0 和重力加速度 g 下运动的轨迹参数方程定义为

$$\begin{cases} r = r_1 + v_0 t \cos \alpha \\ y = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2, 0 \leq t \leq \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\alpha \in (0, \pi/2)$ 为初速度方向与水平面的夹角,消去参数 t 得

$$\begin{aligned} y &= -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} (r - r_1)^2 + \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} (r - r_1), \\ r_1 &\leq r \leq r_1 + \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \end{aligned} \quad (2)$$

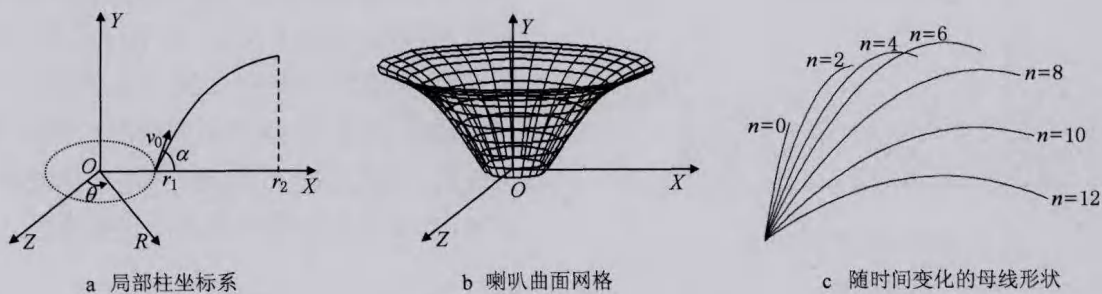


图 3 溅水曲面模型

如图 3 a 所示,在轨迹上取一段 $r \in [r_1, r_2]$ 作为母线,将其绕 Y 轴旋转一周可得一喇叭形曲面,其中 $r_2 \in [r_1, r_1 + \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}]$ 为喇叭曲面的外沿半径;喇叭曲面均匀采样后可得到图 3 b 所示对应的离散四边形网格.

为了模拟卡通溅水的动态,需要随时间对喇叭曲面的形状进行控制.由式(2)可知 α 决定喇叭曲面的倾角, v_0 决定喇叭曲面的弯曲程度, r_2 决定喇叭曲面的外沿大小.经过实验,图 1 前 3 幅所示手工绘制的卡通溅水曲面可由方程

$$\begin{cases} \text{上升阶段} \begin{cases} \alpha_n = 0.45\pi - 0.014\pi n \\ v_{0,n} = 80.0 + 2.9n, 0 \leq n \leq 7 \\ r_{2,n} = 50.0 + 64.3n \end{cases} \\ \text{下降阶段} \begin{cases} \alpha_n = 0.35\pi - 0.04\pi(n-7) \\ v_{0,n} = 100.0 - 4.0(n-7), 7 < n \leq 12 \\ r_{2,n} = 500.0 + 20.0(n-7) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

模拟.其中 n 代表溅水动画序列的帧数.在手工绘制溅水动画中一共需要 13 幅画面完成溅水的上升和下降过程,图 3 c 给出用式(3)计算出的偶数帧喇叭曲面的母线形状.

从图 1 中可以看到,动画师为了表现更加激烈的溅水常把喇叭曲面母线画得更直一些,我们可以在式(2)中改变 v_0 和 r_2 的大小来控制喇叭曲面的弯曲程度及大小,也就控制了溅水的激烈程度.应该

指出,用参数控制溅水激烈程度是本文模型的一个明显的优点,因为在手工绘制动画中不同激烈程度的溅水需要分别画出不同的序列.

2.2 溅水纹理

下一步是在喇叭曲面上绘制动态纹理.为了方便,绘制我们建立喇叭曲面和一个长方形之间的映射关系,该长方形作为纹理平面,在其上生成的动态纹理逐帧映射到喇叭曲面上.观察图 1 手绘序列可以发现,溅水边缘有若干个尖端,尖端之间构成凹形的低谷,整体上它们构成类似皇冠的形状.为了模拟这个形状,本文首先在方形内定义若干条竖线,它们高度不一,如图 4 a 虚线所示.取每 2 条相邻竖线的上边缘点 p_i 和 p_{i+1} ,在它们之间插入一段向下凹的弧形 ARC_i ,如图 4 a 实线所示.该弧形曲线可由 p_i, p_{i+1} ,以及 p_i 和 p_{i+1} 的中间点 p_i^m 这 3 个点用三次 B 样条插值得到,

$$p_i^m = \mu p_i + (1-\mu) p_{i+1} + d.$$

其中, $\mu \in (0, 1)$ 控制 p_i^m 在 p_i 和 p_{i+1} 连线上的位置,向量 d 控制 p_i^m 偏离连线的距离和方向.

为了得到更为激烈的溅水纹理,可在每个弧 ARC_i 的跨度内再插入第二层的小弧 $ARC_{i,j}$,得到溅水纹理上边缘的轮廓,如图 4 b 所示.

纹理的动态变化与溅水所处的阶段相关.在上升

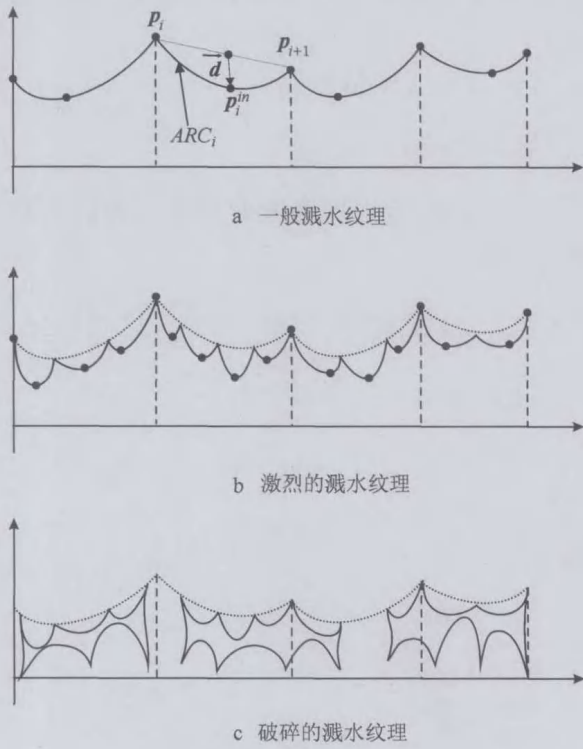


图 4 溅水纹理

阶段,竖线的高度增加,则弧形的偏离距离 $|d|$ 加大,以模拟溅水因能量逐渐增加而越来越激烈的效果;在下降阶段,竖线的高度减小,以类似上边缘轮廓的构造方法构造下边缘轮廓,同时溅水纹理逐渐分离成若干组,如图 4 c 所示,用以模拟溅水曲面后期破碎的效果.最后将生成的动态纹理映射到喇叭曲面,便得到卡通溅水的主体部分,如图 5 所示.

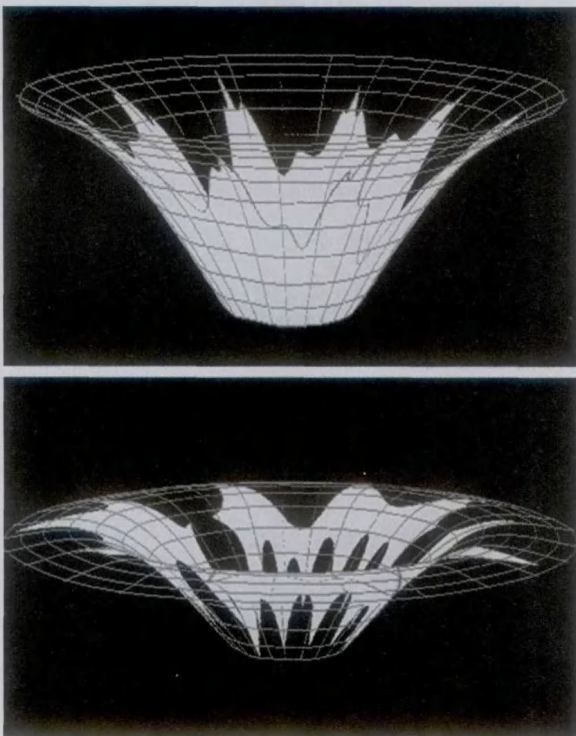


图 5 溅水纹理映射到喇叭曲面

3 零散水花建模与控制

在卡通溅水序列中,围绕溅水曲面还画出若干零散水花,这些水花有多种形态,难以对其进行三维建模.由于这些水花在不同视点下观看形状是类似的,所以本文采用 Billboard 技术绘制零散水花,即让水花形状始终朝向视点.

3.1 水花形状

卡通零散水花在形状上可分为水滴形、N 形、V 形和 W 形等多种,每一种都可用简单的基于骨架的模型来构建,如图 6 所示.其中虚线是每种水花的骨架,黑点是在骨架基础上用简单的模型计算出的控制点位置;然后用 B 样条曲线对控制点插值便可得到围成水花形状的轮廓线,如图中实线所示.因篇幅限制,本文略去计算控制点的详细描述.

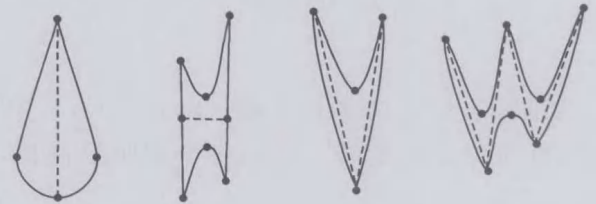


图 6 水花形状类型

3.2 动态控制

每个水花的运动均需要独立控制.本文将水花看作粒子,其重心位于 Billboard 中心.在水花整体控制上,在每一帧溅水曲面外沿附近随机选取一些位置,用柱坐标表示为 $p(r', \theta', y')$. 每个位置上生成一个粒子并为其分配一种水花形状类型,该类型在其整个生命周期内不改变.每个粒子在生成时继承当前帧溅水曲面外沿的运动速度,用柱坐标表示为 $v(v_r, 0, v_y)$, 其中 $v_r = v_{0,n} \cos \alpha_n$, $v_y = v_0 \sin \alpha_n - \frac{(r' - r_1)g}{v_{0,n} \cos \alpha_n}$, v 的方向为在 $\theta = \theta'$ 的平面内沿喇叭曲面母线的切线向外.粒子随后脱离溅水曲面,并遵照运动方程

$$\begin{cases} r = r' + v_r t \\ y = y' + v_y t - \frac{1}{2} g t^2, \quad 0 \leq t \leq \frac{2v_{0,y}}{g} \end{cases}$$

独立在三维空间运动.

粒子在运动过程中逐渐变小,当粒子落入水面或缩小到设定的阈值时,该粒子消失.我们在每一帧

每个粒子所在位置根据粒子当前大小放置一个合适大小的 Billboard,并在其上绘制对应的水花形状。

4 水面涟漪

对于水面,可以采用平面来表现安静的湖面,也可以用 FFT 方法^[15]生成有微波荡漾的水面;水面上的涟漪纹理则采用文献[13]方法生成。以物体落水点作为中心,放置一系列半径逐渐增加的同心圆作为涟漪的骨架;骨架向外辐射扩大,并逐渐开始分裂;离物体越远,相应的分裂涟漪之间的距离越大。在每段骨架线两侧各用一系列振幅、周期变化的正弦函数曲线围成涟漪的形状;涟漪的宽度随着向外辐射而变窄,可用宽度系数与骨架上正弦函数相乘来实现。关于涟漪更详细的建模描述见文献[13]。

5 实验及结果分析

本文系统在 Pentium 2.4 GHz CPU, 2 GB 内存, NVIDIA 8600GT 显卡, Window XP 操作系统下实现,开发软件是 Visual C++ 2008 和 OpenGL

SDK。用本文模型生成一个三维卡通溅水动画的速度为 60 帧/s。与动画师手工一天只能画出 30~50 幅动画序列相比,本文模型可以极大地提高生成溅水动画的效率。

图 7 展示的是 3 幅模拟图 1 手工绘制的轻微程度溅水的效果。可以看到,本文模型能够较好地保持手工绘制卡通溅水的艺术特征。值得特别一提的是,本文模型可以很方便地在高层上控制溅水的位置、大小和数目。因此,用户采用本文模型可以很容易地实现诸如众多石头落入水面的特效,图 8 所示为 2 幅这种特效的画面,而用手工绘制这种特效工作量极大。

图 9, 10 分别给出了更加激烈的溅水动画效果。相对于图 7 的溅水序列,更激烈的溅水主要反映在溅水曲面的弯曲程度变小、倾角减小、曲面变大,溅水纹理上边缘轮廓更复杂、层次更多,分裂出的水花也随之变大变多,此外水面涟漪也变大。只需在模型中调整溅水喇叭曲面的 3 个系数(α, v_0, r_2)以及它们的动态控制方程、溅水纹理上边缘的弧 ARC_i 的密度和层次、水花产生的概率,以及涟漪的宽度和间隔距离,便可以生成多种不同激烈程度的溅水效果。



图 7 轻微溅水动画序列

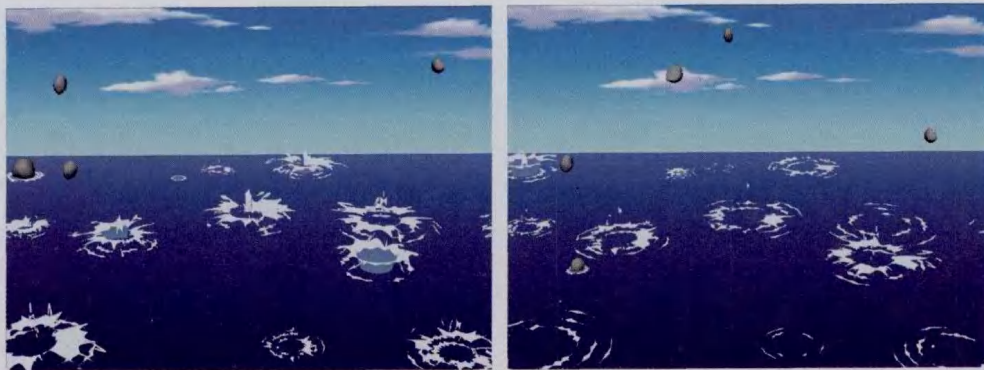


图 8 多物体落入水面的溅水动画序列

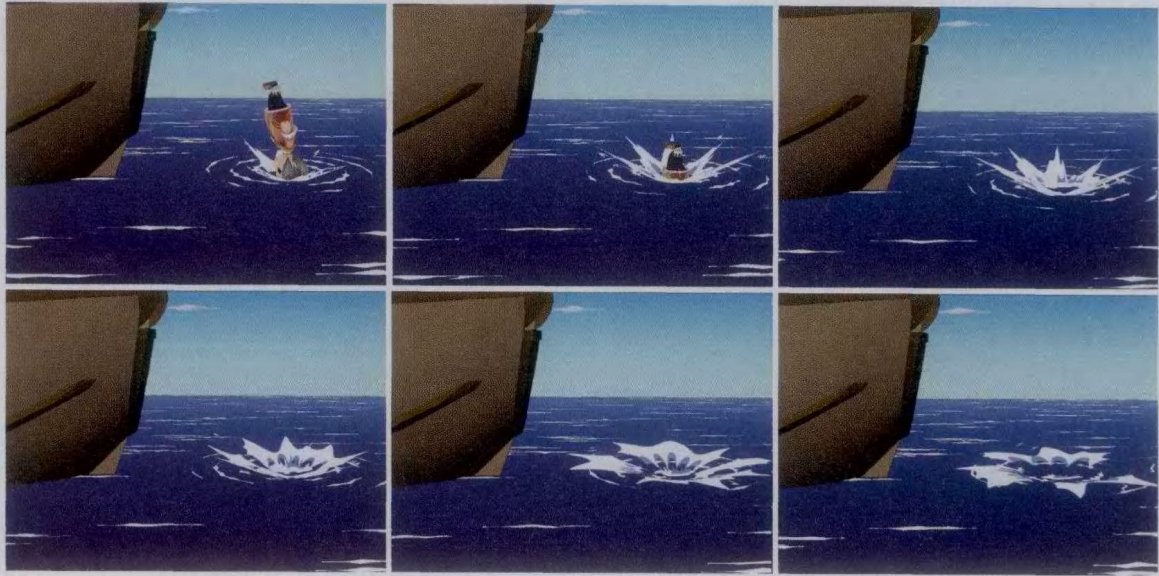


图 9 中等溅水动画序列

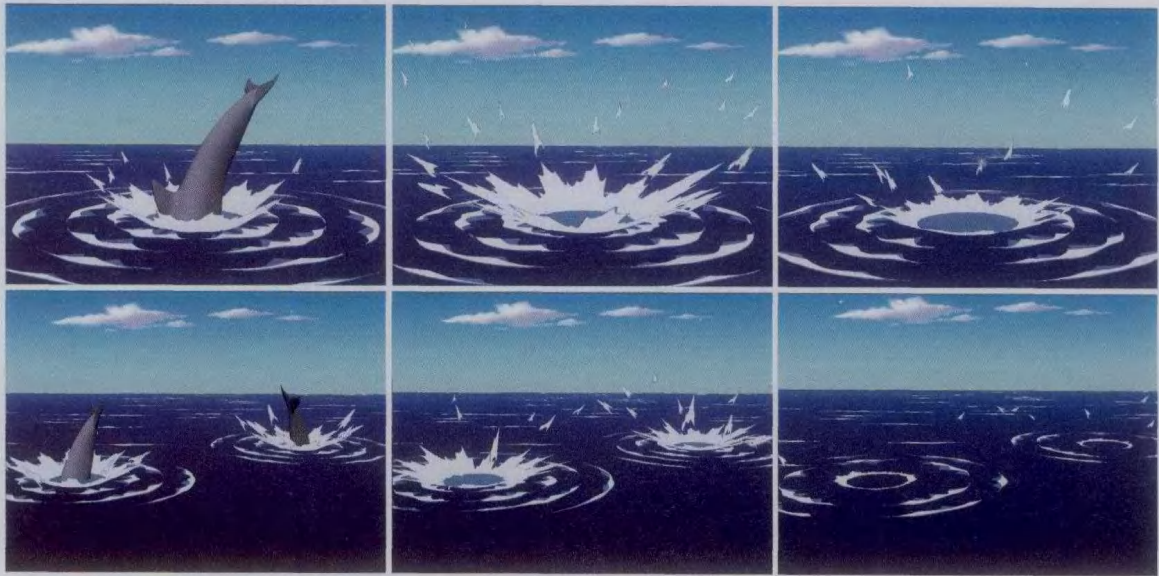


图 10 激烈溅水动画序列

6 结束语

近年来有很多三维卡通动画问世,但其中的水特效依然采用真实感水表示.本文提出的三维卡通溅水模型可以直接用在三维卡通动画中,从而保持动画中不同物体之间的风格一致性.本文模型不仅速度快,生成溅水动画序列可达实时,而且灵活,可以直接通过调整模型参数来控制溅水的大小、位置、数目、外形以及激烈程度等.下一步我们将向更复杂的卡通水动画生成扩展,包括物体出水的效果、水中船只高速运动时激起的浪花效果等.

参考文献(References):

- [1] Iglesias A. Computer graphics for water modeling and rendering: a survey [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2004, 20(8): 1355-1374
- [2] Adabala N, Manohar S. Techniques for realistic visualization of fluids: a survey [J]. *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(1): 65-82
- [3] Witting P. Computational fluid dynamics in a traditional animation environment [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1999: 129-136
- [4] Eden A M, Bargteil A W, Goktekin T G, *et al.* A method for cartoon-style rendering of liquid animations [C] // *Proceedings of Graphics Interface*. New York: ACM Press, 2007: 51-55

- [5] Di Fiore F, Claes J, van Reeth F. A framework for user control on stylized animation of gaseous phenomena [C] // Proceedings of Computer Animation and Social Agents. Geneva: John Wiley & Sons, 2004: 171-178
- [6] Thornton J D. Directable simulation of stylized water splash effects in 3D space [C] // Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2009: Article No. 94
- [7] Yu Jinhui, Xu Xiaogang, Peng Qunsheng. Cartoon water forms synthesis using random sinusoidal functions [J]. Journal of Computer Research and Development, 2001, 38(5): 519-523 (in Chinese)
(于金辉, 徐晓刚, 彭群生. 用随机正弦波拟合卡通流水[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(5): 519-523)
- [8] Yu J H, Xu X G, Wan H G, *et al.* A cartoon water model for stereo animation [J]. Journal of Software, 2001, 12(7): 960-966
- [9] Yu J H, Jiang X N, Chen H Y, *et al.* Real-time cartoon water animation [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2007, 18(4/5): 405-414
- [10] Chen Tianzhou, Yan Hongjie, Yu Jinhui. A cartoon water system [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2479-2492 (in Chinese)
(陈天洲, 鄢宏杰, 于金辉. 卡通流水生成系统[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2479-2492)
- [11] Yu J H, Liao J, Patterson J. Modeling the interaction between objects and cartoon water [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2008, 19(3/4): 375-385
- [12] Yu Jinhui, Luo Guoming, Peng Qunsheng. Computer generation of 3D cartoon water jet [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(9): 1389-1393 (in Chinese)
(于金辉, 罗国明, 彭群生. 计算机生成三维卡通风格喷水效果[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(9): 1389-1393)
- [13] Yu Jinhui, Bao Hujun. Computer generation of cartoon ripples and shimmering [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2001, 28(2): 216-221 (in Chinese)
(于金辉, 鲍虎军. 计算机生成卡通涟漪及波光闪烁效果[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2001, 28(2): 216-221)
- [14] Fang Jianwen, Yu Jinhui, Chen Haiying. Computer generation of 3D cartoon water colliding with objects [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 507-512 (in Chinese)
(方建文, 于金辉, 陈海英. 3维卡通水与物体交互作用的动画建模[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 507-512)
- [15] Mastin G A, Watterberg P A, Mareda J F. Fourier synthesis of ocean scenes [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, 7(3): 16-23