

# 计算机生成3维卡通烟尘动画

陈天洲 黄颖 于金辉

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** 为了能够表现不同透视和视点下的3维卡通烟尘动画,给出了一个计算机自动生成3维卡通烟尘动画的模型。该模型首先对手工绘制的卡通烟尘进行分类,然后通过构建它们的骨架来定义出各种类型卡通烟尘的静态结构与动态结构,最后在骨架的基础上,通过简单的模型绘制出卡通烟尘的形态。该模型的特点是把骨架定义在3维空间上,这不仅仅可以表现不同透视和视点下的各种卡通烟尘效果,而且避免了手工绘制相应动画效果时的重复劳动。

**关键词** 烟尘 模型 卡通动画 计算机动画

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)05-0679-05

## Computer Generation of 3D Cartoon Puff and Dust

CHEN Tian-zhou, HUANG Ying, YU Jin-hui

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

**Abstract** This paper presents a computer model capable of generating cartoon puff and dust. We first classify existing cartoon puff and dust into different types according to their forms and dynamics, then construct skeletons defining their static and dynamic structures in 3D space. Based on those skeletons, final forms depicting relevant puff and dust are added to skeletons. The advantage of our model over the hand-drawn cartoon puffs and dust is generating cartoon puffs and dust with perspective under different view points which can effectively avoid repetitive work of the animator when drawing corresponding effects.

**Keywords** puff and dust, model, cartoon animation, computer animation

## 1 引言

烟尘是人们生活环境的因素之一,在卡通动画中,烟尘效果不仅用来表现烟雾和尘雾,还用来强调撞击以及速度等。由于卡通烟尘在形态以及运动方式上有别于卡通人物,所以动画绘制人员要特别掌握表现它们的方法。在高质量卡通动画绘制过程中,一般需要雇佣受过高级专门训练的人员来完成这些效果的绘制,这就相应地增加了制作成本。对于某些烟尘效果,如汽车兜圈过程中的喷烟,由于透视的关系,致使喷烟的形状在汽车兜圈过程中的不同位置上是不同的,因此动画师需要分别画出它们。若要改变烟尘动画的视点,则动画师就需要重新画出新视点下的

动画序列,其结果是既增加了制作时间,也增加了制作成本。如果用计算机方法来自动生成这些效果,则可以缩短制作周期,并可降低制作成本。

在过去20年中,计算机图形研究人员提出许多表现火焰和烟雾的方法,如Reeves通过粒子系统来模拟火焰<sup>[1]</sup>;Perlin利用湍流函数来生成太阳冕<sup>[2]</sup>;Thalamann用同样的方法设计出一个更通用的火焰函数模型<sup>[3]</sup>;Inakage根据一个物理的燃烧模型成功地再现蜡烛火焰<sup>[4]</sup>;Ohshima和Itahashi给出一个基于2维分形纹理和其他处理技术来生成篝火的方法<sup>[5]</sup>;Agui, Kohno和Nakajima提出用蜂窝状自动装置(cellular automata)按简单准则进行状态转换来模拟酒精灯的焰苗<sup>[6]</sup>;Gardne用分形椭圆来为火焰建模<sup>[7]</sup>;Sakas提出基于湍流频谱理论的模拟湍流

基金项目:国家自然科学基金项目(60373037);国家“863”高科技发展计划项目(2004AA119060)

收稿日期:2005-04-12;改回日期:2005-06-07

第一作者简介:陈天洲(1970~),男,1998年获浙江大学计算机博士学位,副教授,现为浙江大学研究生导师。主要研究方向为嵌入式系统、计算机图形学。E-mail: hanholly@sina.com

气体的方法<sup>[8,9]</sup>; Nishita 等给出一个生成烟雾静止图像的显示方法<sup>[10]</sup>; Chiba 等通过湍流可视化模拟 2 维火焰和烟雾<sup>[11]</sup>; Stam 和 Fiume 用扩散过程表现火和其他气体现象<sup>[12]</sup>。Foster 和 Metexas 通过求解气体运动方程来模拟热气与物体相遇的情况<sup>[13]</sup>。

上述工作大都致力于生成真实感的火焰和烟雾动画,而关于卡通火焰自动生成的文献则较少。YU 和 Patterson 提出一个等级结构的卡通火焰模型<sup>[14]</sup>,在该模型内用 3 级分别控制各个卡通焰苗的位置、骨架以及形状。于金辉等提出一个卡通烟雾模型<sup>[15]</sup>,该模型可以生成香烟在安静环境下冒出的烟缕以及烟筒冒出的浓烟效果,其缺点是不能生成在透视或视点变化条件下的卡通烟雾。本文提出的卡通烟尘模型,不仅可以再现卡通中的撞击、喷烟以及大尺寸效果,还能表现改变透视和视点后的效果。由于这些效果在形态上各不相同,因此在模型中把它们分类进行建模控制。

## 2 卡通撞击效果

卡通动画的烟尘效果不仅可用来表现烟雾和尘雾,还常常被用来强调撞击效果,比如卡通动画中猛地关门时,常常在门边一些位置上画出若干射线,用以表示尘雾突然冒出的效果(见图 1),而在射线顶部位置上各个尘雾团则随时间逐渐变小,直至消失。这个过程一般持续 5 幅画面左右。



图 1 撞击效果的卡通表现<sup>[16]</sup>  
Fig. 1 Cartoon effect of the strike

从图 1 可以看到,卡通烟尘效果是由若干团状的绘画基元表现的,对这些绘画基元进行某种变换和组合就可以生成不同的烟尘效果。由于这些绘画基元看上去近似梅花瓣,因此可先用半径为  $R_b$  的球作为梅花瓣骨架,然后再用一些短弧线围绕该椭圆骨架描绘出烟团(如图 2 所示),其中各短弧的位置、大小在一定范围内随机变化。

由于烟尘团的形状在各个方向看起来是相似的,

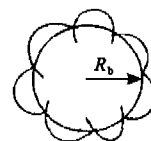


图 2 烟尘团绘画基元骨架及其轮廓

Fig. 2 Puff and dust painting basic framework and figure

所以可在模型中采用 2 维和 3 维相结合的方法来处理烟尘团模型,即把骨架定义在 3 维空间上(它可以表现视点在 3 维空间中的变化),骨架经过投影后在显示平面上是 2 维的,短弧线则直接添加在 2 维投影骨架上,这样就可以充分利用 2 维模型的处理速度。

在强调撞击的尘雾效果中,除了上述烟尘绘画基元外,还有一些辐射线以及五角星的形状,它们在撞击的中心周围向外运动。用模型再现这些效果不仅需要先确定撞击的中心位置,而且这与具体场景有关。以关门为例,其撞击点往往发生在门扇与门框开启的那个边。由于该门边线在 3 维场景中是由两个端点(实际上是门框的角点)  $P_1^{end}$  和  $P_2^{end}$  确定,因此本文通过一个简单的随机插值就可以在这两个点连线上选取一些点  $P_i (i=1, \dots, k)$  来作为撞击点的初始位置,若用矢量  $v_i$  来近似辐射线,并以与门框所在平面的法矢量  $v_d$  成  $45^\circ$  角的方向向外指,即  $v_i = v_d + v_{n,i}$ 。



图 3 卡通关门尘雾效果

Fig. 3 Cartoon animation of puff and dust of closing the door

这里  $v_{n,i}$  是门边线上的第  $i$  个坐标点  $P_i$  处的矢量,它的方向沿门边线向外指,并且与门边线垂直。根据实验,  $v_i$  的长度一般取门边线长度的 0.1 ~ 0.15 倍,效果较好。烟团骨架的中心位置可以通过在辐射线顶点位置附近加上小量随机扰动来确定,骨架半径  $R_b$  (下角  $b$  代表骨架) 初始值也取门边线长度的 0.1 ~ 0.15 倍,其随着时间变化而逐渐变小至零,对应着尘雾团变小直至消失。各个尘雾团随机地从 3 到 5 幅画面完成消失过程。图 3 了给出计算机生成的尘雾效果。在具体绘制尘雾团时,可用灰色描绘其轮廓线,而尘雾团内部则用浅灰色。

## 3 汽车喷尾烟雾

在卡通动画中,像汽车急速排出的尾烟需要用

两个或更多的不同形状的烟雾团表现,或许还要变化烟雾团和烟雾圈,以避免相同的烟雾团看起来机械(见图 4)。在一些滑稽动画中,管道破裂也采用类似的形状来表现喷出的气体。



图 4 汽车尾烟的卡通表现<sup>[16]</sup>

Fig.4 Cartoon animation of puff and dust of steam tailstock smoke

从图 4 可看到,汽车喷尾烟雾随时间推移向后喷出,但在离喷嘴近处和远处烟雾的形状是不同的,离喷嘴最近的一个烟雾一头尖一头圆,接着一个呈现出椭球状,下一个呈现圆球状,最后一个则是一些分布在扩大的椭圆上分裂的烟团。

由于汽车喷尾烟雾方向性较强,因此可首先在 3 维空间定义它们的骨架,其中离喷嘴最近的烟团骨架实际上就是一个 3 维矢量,它的起始点就是喷嘴端点  $P_0$ ,它的方向就是喷嘴轴的方向,它的长度用户可根据实际需要确定;接着系统就可以计算出该矢量的终点  $P_1$ ,而把该 3 维矢量投影到显示平面后就得到两个点  $\hat{P}_0$  和  $\hat{P}_1$ ,它们的连线就是 2 维烟团的骨架;得到骨架后,可进一步在  $\hat{P}_0$  和  $\hat{P}_1$  连线两侧添加两个控制点  $\hat{P}_2$  和  $\hat{P}_3$ ,这两个控制点的长度取为  $0.5|\hat{P}_0\hat{P}_1| + \Delta$ (这里  $\Delta$  是加入的随机扰动,其目的在于避免生成的烟团形状过于规则化,给人以机械感);然后用样条曲线对  $\hat{P}_0$  和  $\hat{P}_1$  以及两侧添加的控制点进行插值即可得到水滴形曲线(如图 5(a)所示);最后再用一些短弧线围绕该水滴形曲线来描绘出烟团形状。

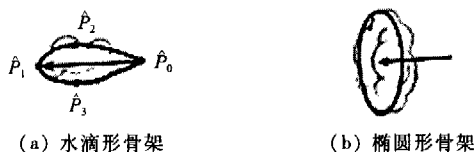


图 5 尾烟骨架示意图

Fig.5 Tail smoke skeleton

离开喷嘴的第 2 个烟团,其骨架是一个圆,该圆所在平面的法向矢量与喷嘴轴的方向重合,该圆的半径也取为  $0.5|\hat{P}_0\hat{P}_1| + \Delta$ ,通过投影后,该圆在显示平面中的大多数情况下为椭圆(如图 5(b)所示)。烟团形状亦可用一些短弧线围绕该椭圆描绘出。

第 3 个烟团处理起来比较简单,在圆形骨架上随机添加一些短弧线即可。

第 4 个烟团的处理相对复杂一些,其骨架同第 2 个烟囱相似,也是一个圆,且该圆所在平面的法向矢量与喷嘴轴的方向重合,但圆的半径要大些,经过对图 4 进行的测量可知,它为第 2 个烟团圆形骨架半径的 1.5 倍。对于该烟团的形状可分别用烟团沿骨架内外的宽度函数  $W_{in}$  和  $W_{out}$  来定义(如图 6 所示),这里横轴对应于投影后的椭圆骨架。每个手工绘制的烟团形状正弦函数曲线的幅度  $A$  和频率  $\omega$  可以通过加入简单随机扰动来更逼近地模拟。

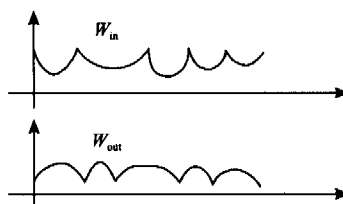


图 6 烟雾宽度控制函数

Fig.6 Smog width control function

由于烟团在椭圆骨架中呈间隔状分布,因此可在模型中增加一个位置控制函数。该控制函数  $f_{position}$  由 0、1 二值构成(见图 7),这里横轴与图 6 的一样,对应于投影后的椭圆骨架。把  $f_{position}$  函数与分布在椭圆骨架两侧的宽度位置控制函数相乘,即可得到间隔分布的烟团,注意,该位置控制函数的起始位置在一定范围内随机变化,然后就可在模型中进一步采用宽度权函数(图 7 中的  $W_{shape}$ )来对各烟团形状进行加权,以使得它们的形状看起来更自然。

最后就是对汽车喷尾序列进行绘制,其绘制的难点在于确定各个烟团生成的位置,这里可以汽车的喷管作为参考位置,而烟团在 3 维空间中的实际位置则由喷管的位置和烟团与喷管的位置矢量计算出来。由于这种情况下汽车的运动速度不会太快,因此烟团的横向运动速度可以近似地认为就是汽车的运动速度,其生成的烟团有随着汽车向前运动的

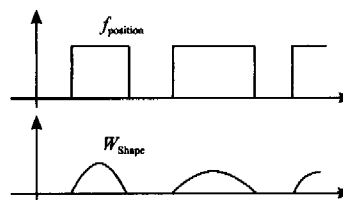


图 7 分裂控制函数及烟雾图形成函数

Fig.7 Fission control function and smog graph weight function

效果。由此可见,烟团与喷管的位置矢量可以由各个烟团的控制点  $\hat{P}_0$  和  $\hat{P}_1$  间距离的 0.15 ~ 0.2 倍加

上随机扰动  $\Delta$  来确定,图 8 给出用以上方法生成的 3 维喷尾烟雾效果。

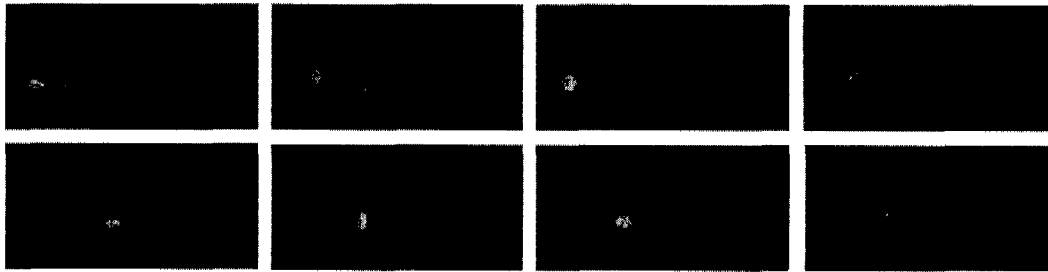


图 8 计算机生成的 3 维喷尾烟雾效果序列  
Fig. 8 Computer produce 3D tail smog effect sequence

#### 4 大尺寸烟尘效果

在卡通动画中,还用尘雾来表现速度效果,如汽车驶过画面时,先在车轮与地面之间画出少量横向尘雾(见图 9),而在车子离开画面后,尘雾则留在原地,但体积逐渐扩大,最后几乎弥散到整个屏幕<sup>[17]</sup>。至于烟尘的消失,在动画中有以下两种表现方法:一个是运用电影里的淡出技术,即把最后一幅烟尘画面,用逐渐降低的百分比曝光并与背景图图像合成;另一个是等尘雾弥散到整个屏幕后,再开始分裂形成若干尘雾团,使每个尘雾团基本上在原位置逐渐缩小并消失。应该指出,在卡通动画中,虽然有时候需要把尘雾的扬起以及消失完整地表现,但有时候却只要表现其前一段尘雾扬起即可。

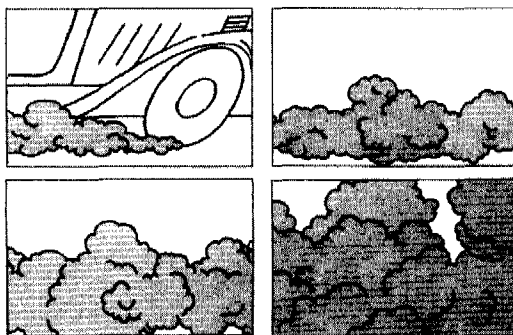


图 9 大尺寸尘雾的卡通表现  
Fig. 9 Big-size puff and dust cartoon display

从图 1 和图 4 可以看到,各个烟尘团基本上是独立地动态运动,烟尘团在画面中也较小,而图 9 中各个烟尘团则逐渐扩大,并互相融合,最后综合起来在画面上就形成较大的烟尘。本文为了把它们区

分开来,把后者叫做大尺寸烟尘。

对于这种大尺寸烟尘效果,可先用一条基本骨架曲线来控制其位置,这条线基本上是一条直线,其一端始于烟尘生起的地方,由用户根据场景交互确定(如车轮和地面相交处),另一端也是根据场景由用户确定;然后在该直线骨架上下两端再用两条与基本骨架曲线平行的直线来控制烟尘占据空间的大小,这两条边缘骨架曲线与基本骨架曲线的距离为  $d(t)$ ,该距离随时间  $t$  增大,相应地烟尘占据的空间也变大。由图 9 可以看到,烟尘的边缘形状大体上呈现不规则弧形线,且弧线的大小也随着时间变大。为了在模型中近似这种边缘形状,可在两条边缘骨架曲线上先排列一些大小不一的圆弧作为它们的骨架,这些圆的半径由  $r_i = kd(t)$  确定,这里  $k$  为随机变化的系数,根据试验,其取值范围在  $[0.5 \sim 1.2]$ ,效果较好。从  $r_i$  的计算公式可以看出,各个圆的半径基本上随着  $d(t)$  的增大而增大,但在系数  $k$  的作用下,圆的半径在一定范围内随机变化。

对于边缘线中间的一些不规则弧形线,本文仍然用大小不一的圆作为它们的骨架,图 10 给出了在两条边缘骨架曲线上以及它们之间画出的圆弧骨架的效果。

在图 10 的圆弧骨架上进一步画出一些短弧线就可以得到最终的烟尘效果。这里烟雾的绘制方法与上面汽车喷尾的略有不同,由于大尺寸烟雾效果一般是在汽车突然加速运动时出现,因此烟雾的横向运动速度可以忽略不计,烟雾只要在原来的位置生成就可以了,只是烟雾骨架半径要慢慢增加,以便产生出烟雾慢慢往四周扩散的效果。图 11 给出的是计算机自动生成的大尺寸烟尘动画序列。

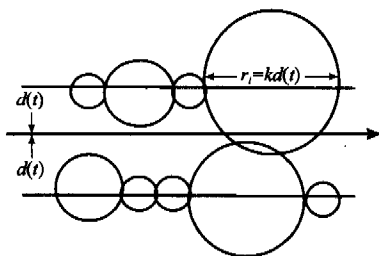


图 10 圆弧骨架在不同位置的分布

Fig. 10 Circular arc skeleton in different position distribution



图 11 计算机生成的大规模烟雾效果

Fig. 11 Computer produce large-scale puff and dust effect

## 5 结 论

本文给出一个自动生成卡通烟尘效果的计算机模型。利用该模型,通过定义的不同类型,用户只要输入少量参数就可以生成卡通撞击、汽车喷尾烟雾以及表现速度的大尺寸烟尘效果。与手工绘制烟尘效果相比,采用模型的优点是具有更大的灵活性,若动画场景发生变化(如门处于不同的位置,汽车运动轨迹变化等,或是视点变化),则需要用手工绘制出完全不同的动画序列,而在模型中,则只要改变相应的骨架控制或改变视点位置参数就可以生成适合不同场景的烟尘效果。

目前本模型仅限于在自由空间中生成卡通烟尘效果,当然这也能满足大部分动画制作的需要。如果在有障碍的受限空间中生成卡通烟尘效果,则需要考虑烟尘与障碍物之间的作用下所引起的烟尘局部性变化和动态变化,这是今后进一步要做的工作。

### 参考文献 (References)

1 Reeves W T. Particle system-a technique for modeling a class of fussy objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3):358~376.

- 2 Perlin K. An image synthesizer [J]. Computer Graphics, 1985, 19(3):278~296.
- 3 Thalamann N M, Thalamann D. The direction of synthetic actors in the film rendez-vous a montreal [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, 17(12):9~19.
- 4 Inakage M. A simple model of flames [A]. In: Proceedings of the Eighth International Conference of the Computer Graphics Society on CG: computer graphics around the world [C], New York, USA, 1990:71~81.
- 5 Ohshima T, Itahashi S. Texture animation Proc [A]. In: Proceedings of the Nippon Computer Graphics Conference (NICOGRAPH '88) [C], Tokyo, Japan, 1988:110~119.
- 6 Agui T, Kohno Y, Nakajima M. Generating 2-dimensional flame images in computer graphics [J]. Transactions Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan, 1991, 2(2):184~189.
- 7 Gardner G. Fractal ellipsoid fire [J]. SIGGRAPH Video Review, 1992, 81(14):184~189.
- 8 Sakas G. Modeling and animating turbulent gaseous phenomena [J]. The Visual Computer, 1993, 9(4):200~212.
- 9 Sakas G, Gerth M. Sampling and anti-aliasing of discrete 3-D volume density textures [A]. In: Eurographics Conference Proceedings [C], Vienna, Austria, 1991:121~134.
- 10 Nishita T, Nakamae E. A Shading model for atmosphere scattering considering luminous intensity distribution of light sources [J]. Computer Graphics, 1987, 21(3):303~310.
- 11 Chiba N, Muraoka K, Takahashi H, et al. Two dimensional visual simulation of flames, smoke and the spread of fire [J]. Visualization and Computer Animation, 1994, 5:37~53.
- 12 Stam J, Fiume E. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion [J]. Computer Graphics, 1995, 29(2):129~136.
- 13 Foster N, Metexas D. Modeling the motion of a hot turbulent gas [A]. In: Proceedings of the ACM 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Technique [C], Atlanta, Georgia USA, SIGGRAPH '97, 1997:181~187.
- 14 YU Jin-hui, Patterson John W. A fire model for 2D computer animation [J]. Computer Animation and Simulation '96, 1996:49~60.
- 15 YU Jin-hui, XU Xiao-gang, PENG Qun-sheng. Computer generation of cartoon smoke [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(9):987~990. [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(9):987~990.]
- 16 Harold W. Timing for animation [M]. Limited, London; Focal Press, 1981.
- 17 YUAN Xiao-li, ZHU Fang-sheng. Cartoon painting technique tutorial [M]. Nanjing: Jiangsu art publishing company, 2002. [袁晓黎,朱方胜. 卡通绘画技巧教程 [M]. 南京:江苏美术出版社, 2002.]