

一种新的三维卡通流水绘制框架^{*}

姜曦楠¹, 姜来生²

(1. 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 嘉兴职业技术学院, 浙江 嘉兴 314036)

摘要:为了更好地表达绘制流体,提出了一种基于 SPH 流体模拟的新的三维卡通流水绘制框架并完成了系统实现。框架可分为 3 个部分:流体物理模拟模块、流体绘制表面提取模块,以及流体非真实感纹理绘制模块。在流体物理模块,通过 SPH 粒子模拟,利用体素化的 Lagrange 算法求解 Navier-Stokes 方程,得到了真实的流体运动信息。在流体绘制表面提取模块,通过 Marching Cubes 算法自动提取流体绘制表面。在流体非真实感纹理绘制模块,提出了两种新的过程化的卡通绘制模型,分别绘制水纹和浪头。实验结果表明该方法能实时自动地绘制非真实感的流体。

关键词:卡通流水;光滑粒子流体动力学;Marching Cubes;体素化;三维

中图分类号:TH164;TM311

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0061-04

A novel framework for 3D cartoon water rendering

JIANG Xi-nan¹, JIANG Lai-sheng²

(1. State Key Lab of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiaxing Vocational and Technical College, Jiaxing 314036, China)

Abstract: Aiming at rendering fluids expressively, a novel framework for 3D cartoon water rendering based on SPH was proposed and a system based on this framework was implemented. The framework was composed of 3 parts: simulation of fluids with physical process, abstraction of fluids' rendering surface, and generating of fluids' non-photorealistic texture. To implement Navier-Stokes equations, Lagrange approach with smoothed particle hydrodynamics (SPH) method was adopted in the module of fluids simulation. Furthermore, the classic approach was improved with voxel method. Fluids surface was abstracted with the algorithm of marching cubes in the module of surface abstraction. Models of ripple and wave in cartoon-style were constructed in the module of non-photorealistic texture generating. The experiment results indicate that our approach can render non-photorealistic fluids automatically in real-time.

Key words: cartoon water; smoothed particle hydrodynamics (SPH); Marching Cubes; voxel; 3D

0 引 言

现实工程中广泛涉及到流体的处理,如喷泉^[1]、油烟^[2]等。计算机流体模拟^[3]是通过迭代算法,求解经典的流体力学 Navier-Stokes 方程实现的。Navier-Stokes 方程有两类数值解算法:一类是基于网格的 Euler 算法^[4];一类是基于粒子的 Lagrange 算法^[5]。

与传统的真实感绘制相比,非真实感绘制可以更好地表达形体内容,因而逐渐成为计算机图形学领域的研究热点。卡通风格的绘制是非真实感绘制的重要组成部分。在少儿教育、科普、宣传领域,卡通绘制风格的流体有着重要而广泛的应用。传统的卡通动画创作费时费力,因此动画产业界急需一种计算机辅助的工具帮助动画创作人员高效地绘制较高质量的卡通流

收稿日期:2010-01-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2006AA01Z312);国家自然科学基金资助项目(60673007);浙江省科技计划资助项目(2009R30014)

作者简介:姜曦楠(1984-),男,浙江海宁人,硕士研究生,主要从事计算机图形学、非真实感绘制方面的研究。E-mail: jiangxinan@cad.zju.edu.cn

水效果。

目前,已经有了一系列较好的程式化的二维卡通风格流水绘制算法^[6-8]。这些算法,通过简单的二维解析方程,加上随机变量,可以简单高效地模拟多种卡通流水的效果。但是目前三维的卡通风格流水绘制还刚刚起步^[9],国内外的研究工作都不多。

本研究所提出的框架在流体动态模拟时,不同于之前基于解析函数的二维卡通流水框架,采用基于 SPH 粒子物理模拟的方法;在非真实感绘制时,借鉴了已有二维卡通绘制算法的思想,提出两种新的卡通流水纹理绘制算法。笔者在这个框架的基础上实现了高质量的三维卡通风格流水绘制。本研究介绍的流体绘制框架包括 3 个模块:流体物理模拟模块、流体绘制表面提取模块,流体卡通纹理绘制模块,如图 1 所示。

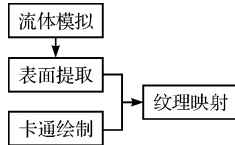


图 1 系统框架

1 流体模拟

本研究系统在流体物理模拟模块采用基于粒子的 Lagrange 算法求解 Navier-Stokes 方程。Navier-Stokes 方程数学形式如下:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\nabla \vec{u}) + \vec{f} \quad (1)$$

流体通过 SPH 方法划分成微粒。SPH 是一种基于插值的粒子模拟算法,在工程上具有广泛的应用^[10]。它通过一个连续的核函数将每个粒子邻域内的流体物理属性卷积,作为粒子的物理属性。离散化的 SPH 粒子任一物理属性表达形式如下:

$$A_s(\vec{r}) = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W(\vec{r} - \vec{r}_j, h) \quad (2)$$

式中 A_s —粒子的某一物理属性(如密度); r —粒子位置; A_j —核半径内粒子的物理属性(如密度); r_j —核半径内粒子的位置。

核函数有多种表达形式,本研究在计算流体密度属性时,采用第 6 度多项式函数作为核函数,其形式如下:

$$W(r, h) = \frac{315}{64\pi h^9} (h^2 - \|r\|^2)^3 \quad (\|r\| < h) \quad (3)$$

在计算流体粒子间受力(包括压力和粘滞力)时,本研究采用 Spiky 函数作为核函数,其形式如下:

$$W(r, h) = \frac{15}{\pi h^6} (h - \|r\|)^3 \quad (\|r\| < h) \quad (4)$$

模拟流水运动时,流体物理属性参数选择如下:重力加速度 $[0, 0, -9.8]^T$ m/s,模拟时间片间隔 0.01 s,大气压 101 325 Pa,流体密度 998.29 kg/m³,质量 0.02 kg,粘滞系数 3.5 Pa·s,核半径 0.045 7 m。

Lagrange 算法在每个时间片内的流程如下:

(1) 根据粒子当前邻域内其他点的位置信息,利用第 6 度多项式函数作为核函数计算粒子所在位置的流体密度。

(2) 流体压强和流体密度成正比,由粒子密度可以计算出粒子所在点的压强,通过计算压强的梯度可以计算出粒子受到的压力。由粒子与核半径内其他粒子的速度差可以计算出粒子受到的粘滞力。由粒子质量计算出粒子重力。

(3) 叠加所有力作用,计算出粒子所受到的合力和加速度。

(4) 由粒子加速度求得粒子速度,再由粒子速度求得粒子位移。

迭代以上 4 步算法流程,可以计算出流体的动态效果。

本研究系统在用 Lagrange 算法求解 Navier-Stokes 方程时运用体素化思想做了优化,以牺牲一部分空间和模拟效果为代价,大大提高了算法的时间效率。

传统的 Lagrange 算法没有粒子空间拓扑信息,在计算每个粒子物理量前,需要遍历计算所有其他粒子是否位于粒子核半径内。这样,如果流体粒子数是 n ,整个流体所有粒子间的位置判断需要的时间复杂度是 $O(n^2)$ 。而当核半径较小时,在计算粒子物理属性时只需要少量核半径内粒子的物理属性参与。这样,如果核半径内的粒子数是 m ,整个流体的物理属性计算的时间复杂度就是 $O(mn)$ 。当核半径较小时, m 总小于一个常数 C ,这样整个流体物理属性计算的时间复杂度就是 $O(n)$ 。可见 Lagrange 算法将大量时间浪费在了检测粒子间距离的计算上了,而真正用于物理量计算的计算量反而较少。

体素化的算法就是将空间划成一系列排列整齐的立方体网格(这在计算机图形学上称为体素),标记每一粒子所在的立方体网格。在计算粒子物理属性时,只要检测粒子所在网格内及相邻网格内的粒子是否在粒子核半径内,而不再需要遍历整个网格空间,提高了原算法的效率。与传统 Lagrange 算法相比,体素化改进后的 Lagrange 算法增加了体素结构信息的存储空间开销,同时由于核半径减小,降低了一定的模拟效果。

体素结构的空问复杂度是 $O(n)$,粒子的空问复杂度也是 $O(n)$,所以体素化改进后算法的空问复杂度仍是 $O(n)$ 。

运用体素化算法对 Lagrange 算法性能的提升和空问剖分粒度成正比。空问剖分得越细,算法性能越高。但当网格接近 SPH 核半径时,再细剖空问就无法提升算法性能。

2 表面提取

与真实感流体绘制不同,非真实感的流体绘制不是基于光线强度信息,而是在通过抽象的点线纹理来表达流体。这些需要绘制的元素都位于流体的表面,所以要提取流体表面作为非真实感绘制的绘制面。本研究系统在绘制面提取模块采用了 Marching Cubes 算法提取流体表面。

Marching Cubes 是一种基于网格剖分的在标量场中提取等值面的算法。如果把流体密度的空问分布作为标量场,就可以运用 Marching Cubes 算法提取流体表面。对于每一个网格, Marching Cubes 算法流程如下:

(1) 读入当前网格每个顶点的标量场值。

(2) 对于每一个网格,每个顶点和等值面值比较大小,得到需要插值的边。需要插值的边是指这样的边,等值面值在边两个端点标量值大小之间。

(3) 在有插值点的边上计算插值点的位置,连接插值点成等值线,由等值线得到等值面三角面片。

迭代上述过程,直至遍历整个空问。

本研究系统通过预处理对经典的 Marching Cubes 算法进行了一定优化。对于每个立方体网格,如果逐边计算每条边的插值点,一个网格 12 条边,共 24 个端点。在算法流程的第 2 步,需要与等值面的值做 24 次比较。本研究系统按端点标量值大于或小于等值面的值做二值化处理,将立方体插值点分布预处理成 2^8 种情形,存在跳转表结构中。在算法流程的第 2 步,一次性比较网格 8 个顶点的,跳转到指定情形,这样只需做 8 次比较。预处理只增加常量空问,就可以将算法流程中检测插值点步骤的计算量减少 $2/3$ 。改进后的 Marching Cubes 算法流程如下:

(1) 创建跳转表。

(2) 读入当前网格每个顶点的标量场值。

(3) 对于每一个网格,一次性比较每个顶点和等值面值的大小,根据跳转表,标定需要插值的边。

(4) 在有插值点的边上计算插值点的位置,连接

插值点成等值线,由等值线得到等值面三角面片。

迭代流程(2)~(4),直至遍历整个空问。

3 卡通绘制

本研究系统的非真实感绘制通过纹理映射方式实现。通过在流体表面建立参数化的坐标,就可以将二维空问纹理映射到三位曲面上去。目前,在计算机图形学中,纹理映射已经是标准接口,是通过硬件实现的。这里只介绍由本研究实现的二维卡通纹理绘制。

卡通流水主要表现形式是水纹和浪头。本研究系统提出了新的程式化的水纹纹理和浪头纹理的绘制方法。

本研究系统的水纹纹理是通过一个简单的经过变形的正弦曲线模拟手工绘制的水纹效果。通过对正弦曲线的振幅,频率和相位随机可以得到类似手工绘制的效果。方程形式如下:

$$y = y_0 + (A + \Delta A) \sin((\omega + \Delta\omega)(x - x_0) + \Delta\varphi) \quad (5)$$

$$(0 \leq x \leq \theta_{\text{rand}})$$

本研究系统的浪头纹理是通过两条摆线作为骨架,在骨架上分布随机大小的圆,模拟手工绘制的浪头效果。其骨架参数方程如下:

$$\begin{cases} x = A(\theta - \sin \theta) \\ y = B \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

4 实验结果及分析

本研究实验的硬件环境如下,CPU: Intel Pentium D 2.8 GHz, GPU: NVIDIA GeForce 7300 GT,内存 1 GB,显存 256 MB。本研究系统除了场景绘制外,粒子模拟和表面提取算法都没有并行硬件加速。

流体模拟模块是计算时间耗费最大的模块,在粒子数 9 000 的条件下,频率为每秒 1 帧,基本达到实时绘制的要求。流体模拟效果如图 2 所示。

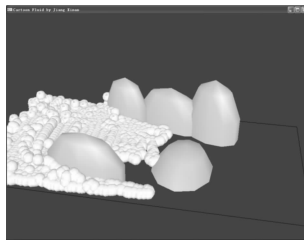


图 2 流体模拟实验效果

Marching Cubes 算法提取表面的效果如图 3 所示。非真实感纹理绘制效果如图 4、图 5 所示。系统集成后的整体效果如图 6、图 7 所示。

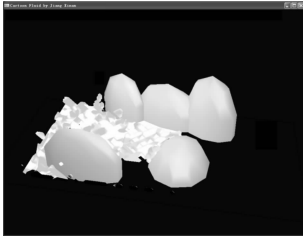


图 3 Marching Cubes 提取效果



图 4 卡通水纹纹理



图 5 卡通浪头纹理

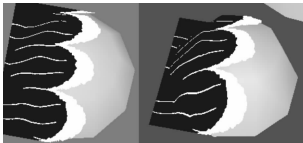


图 6 两个不同视角的集成效果

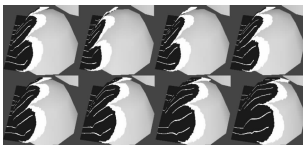


图 7 同视角 8 帧动画序列效果

由实验结果可以看到本研究系统基本实现了三维卡通流体的动画效果。本研究系统可以达到实时要求,且自动化程度较高,对硬件要求低。

如果提高硬件平台条件,本研究系统可以绘制出更好的三维卡通流水效果。

5 结束语

本研究提出了一个新的基于物理模拟的三维卡通流水绘制框架。通过改进传统的 Lagrange 算法, Marching Cubes 算法,减少了算法计算量,提高了效率,使系统基本达到实时性的效果。本研究还提出了两种新

的卡通流水纹理的绘制方法,取得了不错的绘制效果。系统基本实现了卡通流水的动态模拟和绘制功能,可以减轻卡通绘制人员的工作强度。

将来笔者将在现有框架基础上集成更多其他风格的非真实感绘制的纹理效果,并模拟更多的流体物理场景;使系统可以以水墨、钢笔画、油画等非真实感表达形式,表达喷泉、烟雾、海浪等流体场景;力争使系统丰富完善,实现商业应用,帮助动画创作人员高效地创作出高质量的卡通风格流水动画。

参考文献(References):

- [1] 赵治虎,陈国金,张新沂. 基于嵌入式 ARM 的音乐喷泉控制系统[J]. 机电工程,2009,26(5):27-30.
- [2] 曹亚裙,陈建,王灿星,等. 油烟机用多叶离心通风机内部流动的数值模拟[J]. 机电工程,2009,26(6):38-40.
- [3] 柳有权,刘学慧,朱红斌,等. 基于物理的流体模拟动画综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(12):2581-2589.
- [4] STAM J. Stable Fluids[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles: ACM Press,1999:121-128.
- [5] MÜLLER M, CHARYPAR D, GROSS M. Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications[C]//Proceedings of 2003 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. San Diego: ACM Press,2003:154-159.
- [6] YU Jin-hui, JIANG Xi-nan, CHEN Hai-ying, et al. Real-time cartoon water animation[J]. Computer Animation and virtual world,2007,18(4-5):405-414.
- [7] 冯中心,唐敏,董金祥. 卡通风格雨的实时模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(12):1806-1811.
- [8] 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.
- [9] 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 2007. Montreal: ACM Press,2007:51-55.
- [10] 姜涛,张宪,乔欣,等. 基于 SPH 法的土壤切削刀具三维数值模拟及优化[J]. 机电工程,2009,26(6):44-46.

[编辑:李辉]