

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **10**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年10月 第17卷 第10期(总第198期)

目次

综述

张量值图像插值方法综述 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 单建华(1227)

图像分析和识别

非相似度保持投影 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 宋腾义, 汪闽(1274)

计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)
断裂面匹配的破碎刚体复原 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 10 期

2012 年 10 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 10 October 2012

Contents

Review

Overview of tensor valued images interpolation technology Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function Shan Jianhua (1227)

Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application Song Tengyi, Wang Min (1274)

Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1305-07
论文引用格式: 郑涛,徐晓刚,邵承永. 核爆炸外观景象实时模拟[J]. 中国图象图形学报,2012,17(10):1305-1311.

核爆炸外观景象实时模拟

郑涛, 徐晓刚, 邵承永

海军大连舰艇学院装备自动化系, 大连 116018

摘要: 根据核爆炸的基本表现过程, 建立了一个综合的爆炸模型, 可以实现实时的核爆炸景象模拟。通过球形扩张建立冲击波的冲击模型, 并实现了快速的碰撞检测; 使用视角范围内的粒子抛撒, 表现核爆炸产生的飞溅物; 利用适当简化后的 Navier-Stokes 方程, 优化求解策略, 实现具有复杂运动形式的蘑菇状烟云模拟。实验结果表明, 采用该模型可以实现实时的核爆炸效果模拟, 通过控制和调整参量, 可以获得多种不同类型的核爆炸效果。

关键词: 核爆炸; 蘑菇云; Navier-Stokes 方程; 实时

Real-time simulation of nuclear explosion scene

Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong

Department of Equipment System & Automatization, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

Abstract: Based on real nuclear explosions, a comprehensive explosion model is developed, which can achieve real-time simulation of nuclear explosion. Spherical expansion is adopted to express the shock wave, Additionally, fast collision detection is realized. The splash of the nuclear explosion is represented by using particle dispersion within the view range. The Navier-Stokes equations are simplified and solution strategies are optimized. Furthermore, the mushroom is realized with complex forms motion. Experimental results show that using the model can achieve a real-time simulation of the effects of a nuclear explosion. By controlling and adjusting the parameters, many different types of nuclear explosion effects can be obtained.

Key words: nuclear explosion; mushroom; Navier-Stokes equations; real-time

0 引言

近年来, 在电影特效、3D 游戏、虚拟战场等领域, 大量应用了大规模爆炸特效, 核爆炸作为一种特殊的爆炸, 一直受到人们的关注, 但由于其复杂性, 迄今还没有令人满意的效果仿真工作。

现有与核爆炸相关的研究方法, 主要有以下两种: 基于粒子系统的方法和基于物理的方法。Reeves 在 1983 年首次提出粒子系统模型, 并在电影《星球大战》中应用粒子系统方法成功模拟星球爆

炸效果, 该方法后被广泛应用于模拟不规则模糊物体运动^[1]。2003 年, Takeshit 等人提出了一种基于粒子的, 用于仿真爆炸火焰的方法, 能够模拟一定数量的爆炸火焰和爆炸后产生的旋转气流^[2]。同年, Ilmonen 等人基于空间细分算法, 通过二阶粒子系统的动力发生器发射粒子, 提高粒子系统仿真速度, 模拟出更加自然的爆炸、烟雾、云彩等效果^[3]。

基于物理的方法通常使用 Navier-Stokes 方程来建立物理模型, 根据流体的压缩性, 可分为基于可压缩 Navier-Stokes 方程方法和基于不可压缩 Navier-Stokes 方程方法。

收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2012-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60975016), 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1214)

第一作者简介: 郑涛(1988—), 男, 海军大连舰艇学院信号与信息处理在读硕士研究生, 主要研究方向为爆炸效果仿真技术。E-mail: zhengtiao605@139.com

Foster 在 1996 年最早提出将 3 维 Navier-Stokes 方程应用到烟雾仿真中,但在方程求解时,不允许使用大时间步长这一条件,引起了不稳定现象,并导致方程求解时间过长^[4]。对此,Stam 提出半拉格朗日法,该方法求解时允许使用较大的时间步长,不仅增加了了解的准确性,还减少了求解时间,但会引起大量数值耗散^[5]。Fedkiw 等人提出漩涡限制方法,解决了半拉格朗日法在粗网格计算时,漩涡过快过小和数值耗散的问题,但该方法采样网格粗糙,丢失部分细节^[6]。随后,Fedkiw 等人又分别对悬浮颗粒爆炸效果^[7]、核爆炸效果^[8]、爆炸火焰湍流效果^[9]和火焰前部细节效果^[10]进行模拟。2011 年,Lentine 等人提出在半拉格朗日法中,增加两个求解步骤,用以优化平流项,但该方法忽略了不可压缩条件,导致模拟结果不正确^[11]。随后,Lentine 等人将动量守恒应用到方程求解中,不仅弥补了原方法的缺陷,还增强了模拟结果的细节层次^[12]。

上述基于不可压缩 Navier-Stokes 方程方法,忽略流体可压缩性,不能模拟爆炸冲击波效果,而基于可压缩 Navier-Stokes 方程方法,解决了这一问题。

Yngve 等人在 2000 年,应用可压缩粘性流体方程建立模型,对火球、烟尘、冲击波等爆炸效果进行模拟^[13]。Golas 用改进的 Hermite 插值方法^[6]来降低半拉格朗日法的数值耗散,以解决稳定性和大时间步长问题^[14]。Sewall 等人提出一种在松散网格上,模拟复杂场景中固体和可压缩流体交互现象的方法^[15],随后,又模拟了核爆炸蘑菇云、冲击波等爆炸现象^[16]。Kwatra 等人提出一种新的用于减少严格 CFL(courant friedrichs lewy)条件的方法,较隐式方法有更大的时间步长和更快的执行时间^[17]。2010 年,Kwatra 等人将冲击波及相关现象整合到烟雾仿真中,实现对包括冲击波、物体破碎和爆炸燃烧等复杂动态现象的模拟^[18]。

从现有的研究可以看出,对爆炸效果的模拟虽然已经取得了一些成果,但与千差万别的实际核爆炸相比,还是有较大的距离。基于粒子系统的方法和基于物理的方法,在绘制效果和实时性方面,都还难以达到要求。所以在一台普通 PC 机上,实现对核爆炸效果的实时且逼真的模拟,仍然是一项具有挑战性的工作。

实际的核爆炸随炸点、当量、气象、地理环境的不同而不同,根据实际的核爆炸主要过程,采用一种综合的方法对一类核爆炸外观景象进行模拟,应用

球形扩张建立冲击波的冲击模型,利用粒子系统模拟地面核爆炸产生的爆炸飞溅物,并基于物理模型模拟核爆炸形成的蘑菇云,图 1 是综合模型的结构。

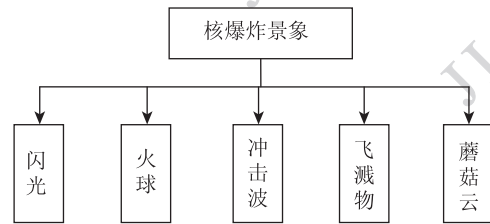


图 1 综合模型结构

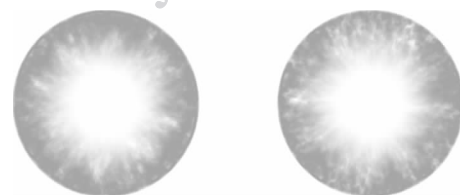
Fig. 1 The structure of collective model

1 冲击波效果模拟

冲击波属于核爆炸杀伤破坏因素的主要组成之一,对人体和物体的杀伤破坏效果主要表现为直接杀伤和间接杀伤两个方面,一般在爆后几秒到几十秒时间内起作用,其杀伤破坏范围与当量有关,但最大一般不超过 20 km^[19]。

采用球模型进行冲击波的扩张模拟,利用球半径进行快速的碰撞检测。在爆炸中心确定后,由于各物体距爆炸中心的距离可以预先求取,因此可以快速完成碰撞检测。冲击波的冲击力是随着距离增大而不断衰减的量,作用到物体上的冲击力可以根据预先计算的受力面积快速获得,进而判断毁伤效果。

冲击波传播的视觉模型可以简化为:冲击波纹理在爆炸中心点产生,并沿所在平面迅速向四周扩散,直至超出冲击波作用范围后纹理消失这一过程。图 2 是两张不同的冲击波纹理,使用两张纹理混合的方法丰富冲击波表现效果,要求两张纹理在爆炸发生瞬间同时产生,并按一定的速率向四周扩散,在扩散过程中通过调整透明度,实现冲击波效果平缓过渡消失。



(a) 纹理1

(b) 纹理2

图 2 冲击波纹理

Fig. 2 Shockwave texture

一般当量为 2 万 t 的空中核爆炸,在爆炸发生后的 10 ~ 15 s,爆炸冲击波传播到约 4 km 处,且强度变弱,破坏作用消失^[19]。所以本文在模拟爆炸冲击波过程中,设定爆炸冲击波纹理存在时间为 13 秒,其中从第 10 秒到第 13 秒之间,纹理开始淡化消失。

2 爆炸飞溅物模拟

有坑地面核爆炸在爆炸点附近形成弹坑,并抛出大量的土石。采用基于粒子系统的方法模拟爆炸飞溅物,将每个土石作为一个微小的粒子,在粒子系统中定义飞溅物粒子的形状、大小等属性,不同属性的飞溅物粒子按一定的运动轨迹运动,并在超出粒子生存期后消失,完成较逼真的爆炸飞溅物效果模拟。

2.1 爆炸飞溅物粒子的产生与初始化

假定爆炸飞溅物粒子在一个以爆炸中心为圆心的圆平面内随机产生。通常粒子产生后会均匀地向四周扩散,以形成爆炸散射效果,但人类本身能接收的视觉信息是有限的,有一部分粒子并不在人的视野范围内,却消耗了同等的系统资源。为了减少渲染粒子时的系统消耗,在初始化飞溅物粒子时仅产生面向视角运动的粒子,这样在保证视觉效果的同时,减少了系统消耗。需要根据核爆炸当量,对飞溅物粒子的基本属性进行初始化赋值。

2.2 爆炸飞溅物粒子的运动与更新

爆炸飞溅物粒子在产生后,运动状态的变化主要包括空间位置、速度和生存期的变化。不同于以往粒子系统在运动过程中,不断产生新粒子并更新的方法,本文简化该模型:规定核爆炸初始产生的飞溅物粒子数目,根据其当量进行调整,在粒子更新过程中不再产生新粒子,已有的粒子在自己的生存期内逐渐消失。此时,核爆炸发生后只形成一次完整的爆炸飞溅物效果,这满足真实核爆炸过程中,只产生一次爆炸飞溅物的物理过程。图 3 给出了产生的飞溅物粒子,在 3 维空间中的受力情况。

为了简化飞溅物粒子的运动复杂度,不考虑摩擦力、风力等其他力对飞溅物粒子的作用效果,仅考虑重力作用。重力加速度用矢量 g 来表示,飞溅物粒子的运动速度矢量为 v ,粒子在运动过程中遵循

$$v = v_0 + gt \quad (1)$$

$$s_K = s_0 + \int_0^K vt dt \quad (2)$$

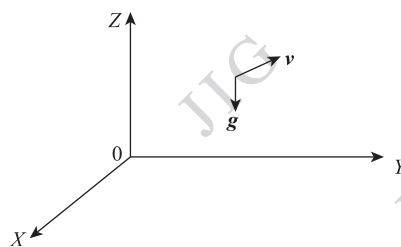


图 3 爆炸飞溅物粒子

Fig. 3 Splash particle

式中, v_0 为飞溅物粒子的初始速度矢量, t 为粒子运动经历的时间, s_K 表示粒子在 K 时刻的位置矢量, K 为粒子运动时间 t 的具体常数值表示, s_0 为飞溅物粒子的初始位置矢量。通过式(1)和式(2),可以计算出 K 时刻飞溅物粒子在 3 维空间中所处的位置。在实际的绘制过程中,通过不断的计算,更新粒子的位置,实现爆炸飞溅物粒子的运动模拟。

3 核爆炸烟云模拟

核爆炸发生瞬间首先看到极强烈的闪光,持续时间一般不超过 1 s,闪光结束后,立即出现一个明亮的高温高压的火球,火球熄灭后形成蘑菇状烟云。针对核爆炸产生的蘑菇状烟云特点,适当简化 Navier-Stokes 方程组,并优化其求解方法,在不影响模拟效果的前提下,提高方程求解速度,模拟效果逼真且满足实时性要求。

3.1 适当简化 Navier-Stokes 方程组

一组完整的 Navier-Stokes 方程组包括连续性方程、动量方程和能量方程,在不同的应用领域具有不同的方程形式。式(3)(4)分别是适合于计算流体力学领域的连续性方程^[18]和动量方程^[5],通常不考虑能量方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + (\rho u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla u + \rho f \quad (4)$$

式中, u 为流体的速度场, ρ 为流体密度, p 为流体压力场, $\nabla \cdot$ 为散度算子, μ 为流体粘性系数, $\nabla \cdot \nabla$ 为拉普拉斯算子, f 为作用在流体上的任何外力,包括体积力和表面力。

在模拟烟云时,主要表现烟云的运动和外观景象,因此进行以下简化:

- 1) 不考虑流体的压缩性。虽然引言中提到的基

于可压缩 Navier-Stokes 方程方法可以定量地反映冲击波的传播规律,但求解复杂影响模拟实时性,而本文已经采用简化的冲击波模型来模拟冲击波效果,所以可对 Navier-Stokes 方程做不可压缩的简化。忽略压力或者温度对流体密度的影响,此时流体流动时密度为常数保持不变,式(3)可简化为 $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ 。

2) 不考虑流体的粘滞效应。蘑菇云运动属于低速运动(速度远小于音速),其内部不会发生明显的动量和能量的迁移,因此可以忽略烟云运动时的流体粘性效果,将方程简化为无粘性 Navier-Stokes 方程,即忽略式(4)中的粘性项 $\mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{u}$ 。

3) 简化烟云受力。核爆炸产生的蘑菇云内部没有受力关系,忽略其受到的表面力作用,而体积力可只考虑重力作用,简化受力项 \mathbf{f} 为 \mathbf{g} 。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} \quad (6)$$

式(5)(6)是简化后的连续性方程和动量方程。简化后的方程,降低了方程求解复杂度,为蘑菇云效果的实时模拟打下了基础。

3.2 方程求解

文献[5]提出的半拉格朗日法对方程求解时,由于方程做了不可压缩的简化,导致求解过程不遵循动量守恒,丢失模拟结果的部分细节。借鉴文献[12]的方法对半拉格朗日方法加以改进,使其满足动量守恒,增强模拟结果的细节层次。

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} + (\mathbf{u}^n \cdot \nabla) \mathbf{u}^n = \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (8)$$

式中, Δt 为时间步长。求解方程组时首先应用式(7)在网格上解得中间速度场 \mathbf{u}^* , 由于该中间值忽略了压力 p 的作用,所以应用式(8)来增加压力的作用,修正中间值。对压力 p 的求解,传统方法直接使用式(9)求解压力值,

$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad (9)$$

式中, p 必须满足 $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$, 导致得到的速度场不满足动量守恒,修改式(9)为

$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} = \nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad (10)$$

令 $\hat{p} = p \Delta t$, 且 $\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \hat{p} = 0$, 则此时的压力值以

大小相等方向相反的方式适用于每个相邻的 \mathbf{u}^* , 保证了整个速度场解满足动量守恒。

3.3 漩涡限制

通常在烟雾和空气的混合体的速度场中,会包含大量各种大小的旋转的湍流结构,而非物理数值耗散会减弱这一现象。漩涡限制可以在流场中的正确位置,重新产生丢失的湍流特征,增加烟雾翻滚时的细节层次^[20]。传统的漩涡限制方法,仅定义一种漩涡限制力,并不能很好地满足多种不同情况,其主要存在以下两个缺陷:一是很难从一个没有漩涡的区域,辨别出耗散区域,使得绘制结果可能出现明显的人工痕迹;二是在限制过程中把漩涡当作一个静态的事物,这会导致无法精确绘制具有复杂能量变化的现象。

文献[21]提出了多层漩涡限制方法,改进传统的单层漩涡限制方法,并应用于水面湍流效果模拟。该方法主要是将漩涡场分为大规模漩涡场和小规模漩涡场:大规模漩涡场应用于场力加速阶段,以保证整体效果;小规模漩涡场应用于流体表面绘制,专注于细节体现。本文借鉴该方法,将大规模漩涡场和小规模漩涡场,分别应用于核爆炸蘑菇云形成初期,和核爆炸蘑菇云形成后的稳定阶段,兼顾了核爆炸蘑菇云的整体和局部漩涡的绘制。

具体方法如下:在不可压缩流体中,定义漩涡 ω 由速度场来确定,即

$$\omega = \nabla \times \mathbf{u} \quad (11)$$

每个漩涡被认为试图使流体按特定方向旋转的力,该力的作用会因为人工数值耗散减弱。通过归一化漩涡位置矢量方程

$$N = \frac{\eta}{|\eta|} \quad (12)$$

来保持这个力的作用,式中 $\eta = \nabla |\omega|$ 。最终得到漩涡限制力

$$\mathbf{F} = \varepsilon h (N \times \omega) \quad (13)$$

式中, h 为网格大小, ε 为漩涡限制因子,其值越大,增加的烟云翻滚效果越明显,但 $\varepsilon \leq 0$ 时式(13)无效。将计算得到的漩涡限制力 \mathbf{F} 添加到式(3)的外力中,即可增加烟云模拟时的漩涡翻腾效果。

4 实验结果

本文方法以普通 PC 机(CPU:英特尔 Pentium Dual-Core E6500 2.93 GHz,内存:2 GB,显卡:ATI Radeon HD 5700 系列)为硬件平台, GarageGames 公

司开发的 Torque 3D 引擎^[22] 为软件平台,在 Windows XP SP3 操作系统上实现,模拟实现的地形网格的三角形面片数为 524 288,显示分辨率始终保持为 1 024 × 768。

4.1 爆炸冲击波

图 4(a)为使用同一张冲击波纹理图片,在不同传播速率和透明度下的冲击波模拟效果。图中外圈冲击波的传播速率大于内圈,且透明度值是内圈的两倍。图 4(b)为同时使用图 2 中的两张不同冲击波纹理,在相同传播速率和透明度值情况下的模拟效果,该效果比单独使用一张冲击波纹理更加丰富。图 4(c)是冲击波俯视效果,图 4(d)是一种真实核爆炸冲击波侧视效果,可以看出本文模拟结果和真实核爆炸冲击波效果比较接近。

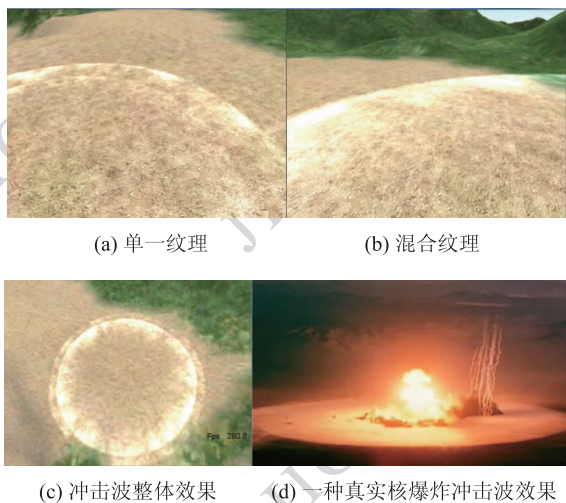


图 4 冲击波
Fig. 4 Shockwave

4.2 爆炸飞溅物

为了测试粒子数量对模拟效果和实时性的影响,分别设定粒子数为 100、200 和 260,此时系统绘制帧数分别为 195 帧/s、157 帧/s 和 107 帧/s。粒子数从 200 增加到 260 时,帧数下降明显但绘制效果变化不大,为了在不影响实时性的前提下兼顾模拟效果,设定粒子数为 200。图 5(a)(b)分别是粒子数为 200 和 260 时的爆炸飞溅物模拟效果。

4.3 爆炸烟云

图 6(a)是小当量山地核爆炸蘑菇云模拟效果,蘑菇云整体色彩比较暗淡,帧数是 154 帧/s;图 6(b)是大当量爆炸模拟结果,蘑菇云整体色彩更明亮,帧数是 120 帧/s;图 6(c)是文献[8]模拟的核爆炸蘑菇云效果,模拟了火球,但每帧绘制时间大约需

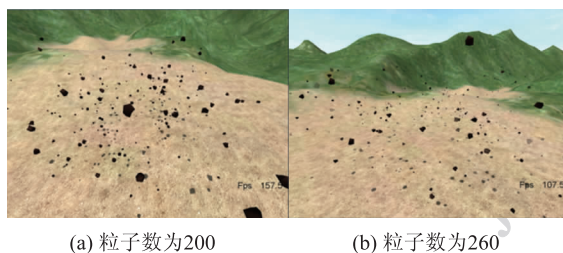


图 5 爆炸飞溅物
Fig. 5 Splash

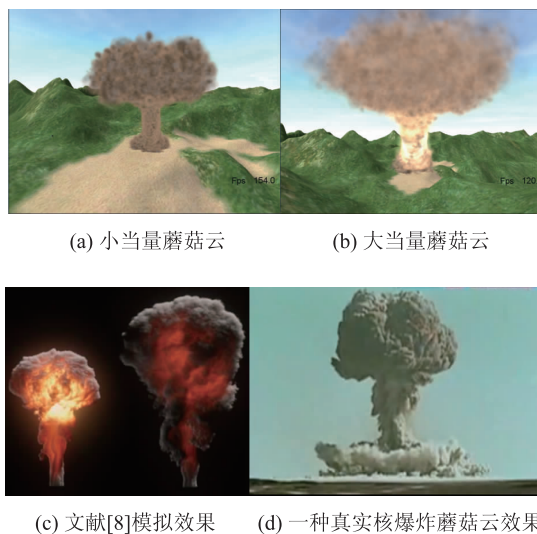


图 6 蘑菇云
Fig. 6 Mushroom

要几秒钟,不具有实时的特性;图 6(d)是一种真实沙漠核爆炸,是远距离观察的蘑菇云效果,与山地核爆炸有所不同。可以看出本文模拟结果比较逼真,且在满足实时模拟的前提下,可通过参数调整,模拟实现多种不同当量、不同色彩的核爆炸蘑菇云。

4.4 地面核爆炸景象

图 7(a)~(d)依次为地面核爆炸后产生的强光、火球和蘑菇云效果;图 7(e)(f)分别是冲击波和爆炸飞溅物效果在整体效果中的表现。整个模拟过程绘制帧数不低于 90 帧/s,具有良好的实时性。

4.5 海面核爆炸景象

图 8 是海面核爆炸的仿真结果,其中图 8(a)是海面核爆炸初期形成的水柱;图 8(b)是整体的海面核爆炸效果,包括蘑菇云和冲击波;图 8(c)是另一角度的视图;图 8(d)是一种真实海面核爆炸效果图。通过比较可以看出,本文方法可以表现出基本

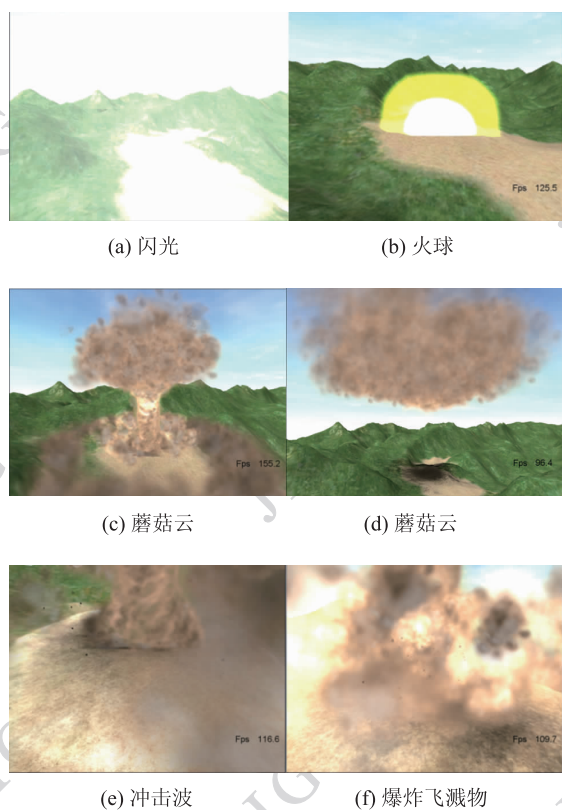


图7 地面核爆炸效果

Fig. 7 The effect of nuclear explosion

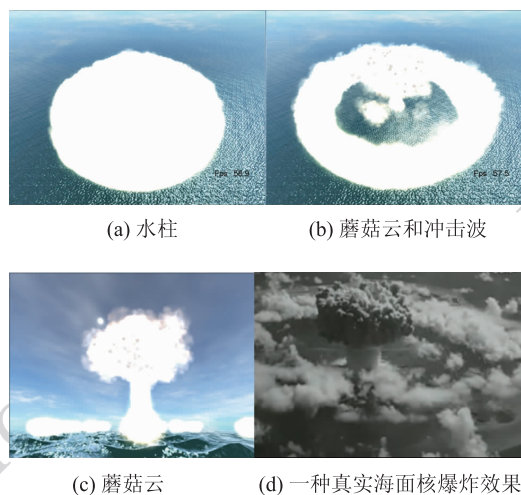


图8 海面核爆炸效果

Fig. 8 The effects of nuclear explosion

的海面核爆炸效果,逼真度较高。不足之处是:冲击波形状过于规则,与真实的海面冲击波效果,存在一定差别。由于在绘制实时海面时,占用了一定的系统资源,模拟海面核爆炸效果时,系统绘制帧数下降较明显,但整个模拟过程不低于 50 帧/s,满足实时性要求。

5 结论

核爆炸在虚拟战场、视频游戏中起着重要的作用,是今后的关注热点之一。由于实际的核爆炸受炸点、当量、气象、环境等因素的影响而千差万别,因此逼真模拟是很困难的工作。在分析核爆炸外观景象特点的基础上,提出一种综合的方法模拟一类核爆炸外观景象。实验结果表明,该方法简单,能达到实时,且具有“参数化”调整功能,为模拟不同模式的核爆炸打下了良好基础。本文模拟方法也成功地应用于某型核爆炸训练模拟系统中。进一步的工作将对不同地理环境下的爆炸效果和对各种人工建造物体的破坏效果进行模拟。

参考文献(References)

- [1] Reeves W T. Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects [J]. *Computer Graphics*, 1983, 17(2):359-376.
- [2] Takeshita D, Ota S, Tamura M, et al. Particle-based visual simulation of explosive flames [C]//*Proceedings of the 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003:482-486.
- [3] Ilmonen T, Kontkaen J. The second order particle system [J]. *The Journal of WSCG*, 2003, 11(2):240-247.
- [4] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1996, 58(4):471-483.
- [5] Stam J. Stable fluids [C]//*Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM Press/Addison -Wesley Publishing Co, 1999: 121-128.
- [6] Fedkiw R, Stam J, Jensen H W. Visual simulation of smoke [C]//*Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM Press, 2001:15-22.
- [7] Feldman B E, O'Brien J F, Arkan O. Animating suspended particle explosions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(2):708-715.
- [8] Rasmussen N, Nguyen D Q, Geiger W, et al. Smoke simulation for large scale phenomena [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(2):703-707.
- [9] Selle A, Rasmussen N, Fedkiw R. A vortex particle method for smoke, water and explosions [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3):910-914.
- [10] Hong J -M, Shinar T, Fedkiw R. Wrinkled flames and cellular patterns [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(2):301-306.
- [11] Lentine M, Gretarsson J, Fedkiw R. An unconditionally stable

- fully conservative semi-lagrangian method[J]. *Journal of Computational Physics*,2011,230(8):2857-2879.
- [12] Lentine M, Aanjaneya M, Fedkiw R. Mass and momentum conservation for fluid simulation[C]// *Proceeding of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. New York: ACM,2011:91-100.
- [13] Yngve G D, O'Brien J F, Hodgins J K. Animating explosions [C]// *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co,2000:29-36.
- [14] Golas A, Khan A, Kalra P, et al. Explosion simulation using compressible fluids[C]// *Proceedings of the 2008 6th Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing*. Washington, DC: IEEE Computer Society,2008:63-70.
- [15] Sewall J, Mecklenburg P, Mitran S, et al. Fast fluid simulation using residual distribution schemes [C]// *Proceedings of Eurographics Workshop on Natural Phenomena 2007*. Switzerland: University of North Carolina at Chapel Hill,2007:47-54.
- [16] Sewall J, Galoppo N, Tsankow G, et al. Visual simulation of shockwaves [J]. *Graphical Models*,2009,71(3):126-138.
- [17] Kwatra N, Su J, Gretarsson J T, et al. A method for avoiding the acoustic time step restriction in compressible flow [J]. *Journal of Computational Physics*,2009,228(11):4146-4161.
- [18] Kwatra N, Gretarsson J T, Fedkiw R. Practical animation of compressible flow for shock waves and related phenomena [C]// *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Switzerland: Aire-la-Ville,2010:207-215.
- [19] The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department Military Training Materials Editing Working Committee. Overview of Nuclear Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2003:1-20. [中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 核爆炸物理概论[M]. 北京:国防工业出版社,2003:1-20.]
- [20] Ma D Y, Zhao X, Xu Q. GPU-based method to simulate the large-scale explosion [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*,2009,26(4):351-354. [马东洋,赵羲,徐青. 基于GPU的大规模爆炸效果模拟[J]. 测绘科学技术学,2009,26(4):351-354.]
- [21] Jang T, Kim H, Bae J, et al. Multi-level vorticity confinement for water turbulence simulation [J]. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*,2010,26(6-8):873-881.
- [22] GarageGames. Torque 3D [EB/OL]. (2011-12-02) [2011-12-02]. <http://www.garagegames.com/products/torque-3d/documentation>.