

雪场景真实感的实时建模与绘制

唐 勇 张 倩

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要 针对计算机图形学中雪场景的真实感渲染的难题,提出了一种实时绘制高真实感雪景的方法。首先采用类衰减正弦函数模拟雪花运动轨迹,在保证真实性的同时大大提高其实时性;然后基于温度变化与不同地表类型影响,提出了实时积雪-融雪模型,通过计算无损失的热传递积雪方程,提高了交互积雪场景动态渲染的真实性;最后采用 GPU 图形硬件加速技术提高了整个过程的计算效率,绘制效果逼真。

关键词 自然场景模拟,积雪-融雪模型,实时绘制, GPU

中图法分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Real-time Modeling and Rendering on the Realistic of Snow Scenes

TANG Yong ZHANG Qian

(Information Science and Engineering Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract Snow meticulous rendering is one of the challenging topics in the field of computer graphics. A method for real-time realistic rendering of snow scene was proposed. First of all, the track of attenuation function as snowfall was applied to snow scenes model based on visual snowfall, which was presented to ensure authenticity at the same time to improve its efficiency. Then real-time accumulating-melting snow model was presented based on temperature change and surface types, by calculating the lossless heat transfer equation, interactive dynamic simulation of the snow scene could be improved. Finally the GPU graphics hardware acceleration technology was used to enhance the efficiency of the whole calculating process. Rendering results are realistic.

Keywords Simulation of natural scenes, Accumulating-melting snow model, Real-time rendering, GPU

自然景物(如森林^[1]、海浪^[2]、风雪等)的实时建模与绘制是计算机图形学和虚拟现实领域的研究热点和难点。一方面,在计算机动画、游戏、影视及军事仿真等视觉窗口领域,有着必不可少的应用;另一方面,风雪场景模拟在现实生活中也有着重大的意义,有助于人们准确预测积雪位置和积雪厚度,防治灾害。同时,不同地表的积雪预测,还有助于减少对地表植被的破坏。

1 相关工作

视景中飘雪场景的模拟,细致地考虑了对雪花模型引入的处理。1904年, Koch的雪花曲线开创了雪花模拟的先河,提出了最简单的分形曲线。随后, Witten和 Sander引入 Diffusion-limited Aggregation(DLA)技术来模拟末端枝状的雪花模型。近年来, Reiter根据实情考虑了含水蒸汽密度的双参数细胞模型,提高了雪花模型的精度^[3]。 Janko Gravner提出结合 DLA描述末端各异的雪花模型和一种理想的固体分层描述雪花生长^[4]。在飘雪模拟方面, Langer等采用三维逆傅立叶变换处理场景图像,并用一系列二维图像序列重建飘雪的场景^[5],但该方法实际上是一种图像处理的方法,真实感不强。陈华杰等人通过对粒子系统与 LOD技术的深入研究,

提出了一种新的应用于大规模场景的雨雪模拟实时算法^[6]。

对于积雪的模拟, Fearnig介绍了据雪花飘落计算积雪厚度和通过稳定性模型来构造由几何面表达的雪场景^[7]。虽然绘制细致且有层次感,但其建模过程复杂,绘制速度很慢,实时性交互差。陈彦云等采用体纹理映射和位移映射技术构造出较为逼真的积雪场景^[8]。 Ohlsson等人采用深度图片来计算地面上每个网格处积雪的数量,并进行遮挡剔除^[9],这样虽然能较快地绘制出积雪场景,但仍需要大量的预处理工作。 Ingar Saltvik等人采用平行算法综合模拟积雪与飘雪场景,以期达到实时快速模拟的目的^[10],但描绘不细致,缺乏层次感。张东阳基于外界温度变化实时调节地面积雪密度^[11],但考虑环境因素单一,且温度在 0℃附近时场景没有变化。

基于前人工作分析,视景中雪粒子的飘落是个复杂的过程,除了自由落体还受到温度、风速和气流等因素的影响,准确求解复杂的运动方程十分耗时。考虑到随着外界因素的变化,会影响其质量大小,将其下落模型改进为随时间变化的类正弦衰减曲线,同时应用随机扰动函数,在满足真实性的基础上大大提高了系统的实时性。

对于提高积雪渲染的真实性和实时性,积雪密度的应用克服了传统雪粒子稳定性的判断,提高了真实性。同时,密度

到稿日期:2009-05-22 返修日期:2009-08-16 本文受 863 项目资助。

唐 勇(1964—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究方向为虚拟现实技术及其应用、软件工程化技术和信息安全, E-mail: tangyong@ysu.edu.cn;张 倩(1982—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学。

随着外界温度和地表成分的变化而不断变化,这一点被许多研究者忽视。本文将积雪-融雪模型应用到雪场景模拟,既真实考虑了多重环境因素对实时积雪的影响,又改进了文献[11]在0℃附近雪场景没有变化的缺点,使整体绘制更加细腻真实。

2 视景飘雪建模

真实性和实时性是衡量雪景模拟的重要指标。我们认真分析了雪景的相关物理模型,力求达到真实性和实时性的平衡,使绘制更加细腻真实。

2.1 雪花模型生长规则

试验与外场观测发现,冰雪晶增长有一个与液滴碰并增长相似的加速过程:冰晶碰并液滴(过冷),形成霰;进而碰并过冷水滴,长大成冰霰;冰晶间相互碰撞、勾连、攀附,快速增长成雪花或者雪团^[12]。

基于单一的扩散限制凝聚模型,设置二维矩阵的中心点为凝聚核,以 r 为半径的圆周随机发射粒子做布朗运动,如图1所示。凝聚核(即雪晶)的密度表示为:

$$\rho(R) = N(R) / (R^d - R^{D-d}) \quad (1)$$

其中, R 为特征长度, N 为粒子数, D 为分形维数, d 是欧几里德维数, $N(R)$ 是与 R 对应的粒子数,取不同的 R 测出不同的 $N(R)$ ^[13]。自然界新雪半径为 0.05mm~4.6mm。

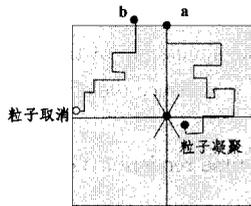


图1 粒子随机产生、行走和凝聚情况示意图

2.2 雪粒子运动轨迹

自然界中雪粒子凝聚核质量很小,受外界因素影响较大,运动模拟极其复杂,求解运动过程也十分困难,因此传统的求解离散三维风场的方法难以满足实时性要求。

传统方法将粒子系统离散应用,每个粒子都需要一些如位置、速度、加速度和生命期等属性来使它区别于其他的粒子。庞大运算量和存储量大大降低了系统的实时性。

为了简化运动方程的复杂度,同时不失真实,把雪花在下落过程中的受力情况进行分析,如图2所示。

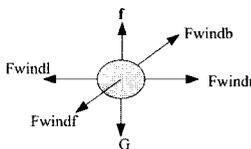


图2 雪粒子受力示意图

图中 G 为雪粒子的重力, f 为雪花下落时所受的空气阻力, F_{windl} 和 F_{windr} 为左右两个方向风对雪花的扰动力, F_{windf} 和 F_{windb} 为前后两个方向的扰动力,它们分别影响雪花的水平运动。雪花左右方向的运动主要与风力的大小和方向有关。为了降低运动方程的复杂度,设 F_{windf} 和 F_{windb} 是两个随机量,初始值均为 0。算法通过 F_{windl} 和 F_{windr} 以及雪花的质量计算出雪花运动的水平加速度 θ ,就可以确定雪粒子随 t 的振幅改变。

综合图1的受力分析,同时考虑到实际场景中会有光照、温度和风速等影响雪粒子质量的大小,使其在运动过程中质量和动量逐渐衰减,为避免计算大量粒子的运动开销,故将凝聚核的运动改进为类正弦衰减函数,以提高系统交互的实时性:

$$f(x) = f(\sin(\theta x + \varphi)/t) * rand() \quad (2)$$

其中, θ 为振幅偏移量, φ 为凝聚核旋转角度(可设置六瓣和八瓣的雪花), x 为雪粒子运动轨迹的横坐标, t 为降落时间, $rand()$ 为随机扰动函数(取值在 0~1 之间)。

3 基于积雪-融雪模型的积雪场景绘制

为了提高系统绘制的真实性,考虑了多重外界环境影响实时积雪的因素。均采用文献[10]的高维离散的三角面片网格化为绘制基础。文献[11]中首次引入温度对积雪密度的影响,但仅考虑外界温度对积雪的影响。出于实际考虑,进一步提出地表的温度变化及地表不同成分对所提出的积雪-融雪模型的影响,以实时绘制积雪,提高模拟的真实性。

3.1 地表温度及类型对积雪量影响

自然场景中,地表温度接近 0℃ 时其变化会影响积雪的融化度。积雪层吸收土壤层之间的热量差,必将引起融雪现象,故实时的融雪也是积雪模型的重要组成部分,是不可忽视的。在给定时间内,实际融化量将影响整个积雪模型,据无损热传递(即能量守恒原理)可及时调整积雪模型进行计算。随时间变化提出积雪-融雪模型如下:

$$\partial S_w / \partial t = P_s - S_m \quad (3)$$

其中, S_w 为随时间变化的地表净积雪量, P_s 为外界大气环境总降雪量, S_m 为地表受热融雪量,即单位体积的质量。

3.2 降雪量的计算

降雪量,指的是每立方米堆积的雪花的质量。文献[11]根据实验情况,提出了经验公式(如式(4)所示),它描述了雪花密度和雪花直径平均值之间的关系。

降雪量受外界温度的影响,其计算如下:

$$P_s = \rho v = 6c / \pi R^3 \quad (4)$$

其中, ρ 表示雪花密度,单位为 g/m^3 ; C 是比例系数,是一个常数,单位为个数。 R 为雪花直径,当外界大气环境温度取值为 0 时,为固定值。根据经验结果, C 取值在 $1.7 \times 10^{-4} \sim 7.2 \times 10^{-4}$ 之间^[11]。

3.3 融雪量的计算

考虑地表部分受热融雪情况对净积雪的影响。融雪量不仅受地表温度的影响,还受到不同地表成分的影响,可由气象预报根据不同地区的试验数据实时计算。

将热学基本公式 $Q = cm\Delta t$ 加以推广应用,吸热使融雪量变化为:

$$S_m = Q_m / c \cdot (T_{gr} - T_m) \quad (5)$$

其中, c 为雪的比热容,通常是冰水比热比例和(冰的比热是 2100J/(kg·℃),水的比热是 4200 J/(kg·℃))。取冰水比例为 1:1,则 c 的取值为 3150 J/(kg·℃)。 T_{gr} 为地表温度,可设置。 T_m 为大气环境温度,计算取值为 0℃。

理想的无损耗热传递方程是:

$$Q_m = Q_{air} \quad (6)$$

引入土壤热性质,地表不同类型成分的放热方程为:

$$Q_{air} = \lambda \Delta t (T - T_{gr}) / d \quad (7)$$

其中, d 为地表深度, A 为单位面积, λ 为不同地表类型的导热常数, t 为融雪持续时间, T 为地表深度 d 所对应的土壤层温度。

根据式(5)一式(7)可导出地表融雪量为:

$$S_m = \lambda A t (T - T_{gr}) / cd (T_{gr} - T_m) \quad (8)$$

其中, 外界温度由系统给出, 据经验公式可知, 随着深度的增加, 土壤日温度变化的滞后效应越来越大。在 40cm 处, 土壤温度趋于 10℃ 稳定不变, 这与 Norman J Rosenberg 的试验结果也是一致的^[15]。据此, 地表类型 λ 和地表温度 T_{gr} 随着时间的变化会影响融雪量的变化, 进而影响地面净积雪量的变化, 如表 1 所列。

表 1 地表不同类型的导热率 λ

地表类型(主成分)	导热率(J/(dm ² ·s·℃))
石英	4.427
沙地(砂粒)	1.674
泥土(泥炭)	6.276
植被(腐殖质)	1.255

综上所述, 新的积雪模型考虑了降雪和融雪两方面因素的影响。出于实际场景考虑, 降雪量仅受外界大气环境温度的影响, 而融雪量受地表温度和地表类型的双重影响。

3.3 净积雪的混合绘制

净积雪量的绘制, 对于一个区域来说, 是一个从没有突然变成一个白色表面的过程, 这种明显的突变将会产生不真实的效果。为了解决这个问题, 用混合顶点颜色实现渐变的过程。积雪颜色是由混合因子 α 值决定的, 当净积雪量为 0 时, 积雪是完全透明的, 随着积雪量的增加, 混合因子 α 的值也不断地增加, 直到 α 为 1.0, 实现真实的渐变过程。

4 系统与实现

4.1 算法实现

输入: 地表类型和外界温度

输出: 绘制雪场景

(1) 根据设定的场景分布粒子源的位置, 确保粒子源均匀分布于视景上方。

(2) 在视景有效上边界处绘制 n 个凝聚核, 按照设置的类衰减函数 $f(x)$ 运动, 并给定 φ 使其自身旋转。

(3) 释放大量粒子做无规则布朗运动, 判断凝聚核的密度 $\rho(R)$ 是否介于 0.05~4.6 之间。若是, 则保存 R 的取值; 若不是, 则舍去。

(4) 根据视景模拟的精度需要, 把场景划分成 j 个三角面片。

(5) 随机在 $1.7 \times 10^{-4} \sim 7.2 \times 10^{-4}$ 之间确定经验常数 C , 用所保存的粒子直径 R 根据上述式(4), 可估算降雪量 P_s 。

(6) 根据输入的地表类型和地面温度, 可计算融雪量 S_m , 从而调整净积雪量 S_w , 进行实时绘制。

(7) 判断雪粒子落在哪个面片上, 绘制积雪, 循环步骤(2)。

4.2 GPU 加速技术

进一步采用 GPU 加速技术来加速绘制积雪场景, 通过顶点着色器和像素着色器来进行显卡加速。具体地, 利用顶点着色器先将初始参数坐标传入显卡, 然后将积雪-融雪模型的实时变化过程放在 GPU 上计算, 具体功能分配如图 3 所示。现在 GPU 运算已具有较强的可编程能力和并行性, 可大大提高绘制速度。同样地, 对于地面上的每个点可以利用

像素着色器计算实时积雪量, 加速绘制, 以增强整个场景的真实感。绘制速度提高 8 倍左右。

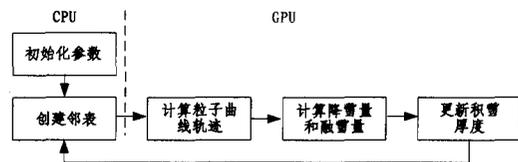


图 3 GPU 和 CPU 功能分配

5 实验结果与分析

5.1 飘雪建模分析

Windows2000 下使用 VC++6.0 和 OpenGL 实现了上述基于不同地表类型和外界温度预测净积雪密度的算法实时模拟。在 2.0GHz CPU、256 内存的 PC 机上做程序测试, 平均绘制速率为 25 帧/s。雪花建模在飘雪场景, 细致的绘制如图 4 所示, 充分展示了雪花的各向异性。应用视景飘雪中类衰减方程取代了用传统方法实时计算每个粒子的位置, 节省了系统资源。大规模场景应用如图 5 所示。实验表明, 上述分析的雪花运动形式是有效的, 且大大提高了实时性。

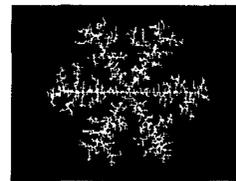


图 4 视景飘雪建模

5.2 绘制积雪效果分析

图 5(a) 是真实自然场景再现, 图 5(b) 是文献[10]利用高维网格存储雪的深度模拟的积雪场景, 图 5(c) 是文献[11]引入温度的变化实时计算每个面片上积雪情况的程序截图, 图 5(d) 是基于温度变化和地表类型对积雪模拟的实现。直接估算净积雪量, 大大简化了积雪模拟算法的复杂性, 实现了积雪的快速模拟。具体功能比较如表 2 所列。

表 2 3 种算法实现功能

算法	飘雪各向异性介质	交互因素	绘制速度
文献[10]			慢
文献[11]		单一	快
本文	实现	多重	快

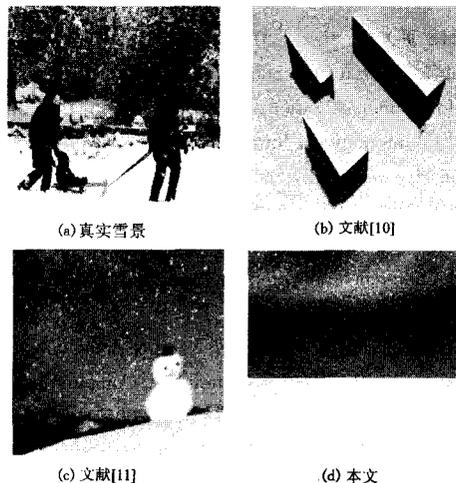


图 5 3 种方法雪场景模拟俯视图

图 5 宏观地展示了 3 个算法的俯视实验效果并通过图 6

(e)一图 6(h)充分地展示了本文实时积雪场景效果的剖面图。

图 6(e)一图 6(h)是地表类型为植被、泥土分别在地表温度是 -1°C 、 1°C 时积雪场景的模拟情况。对比可看出在相同温度和等降雪量情况下,由于泥土导热率较高,热融化量较大,故地表积雪密度较小,场景雪层较稀薄;而纵向对比在相同地表类型中,地表温度越低,等降雪量的情况下融雪量变化微乎其微,积雪密度越大,场景中的雪层越厚实,符合上述的结论和预期效果。实验表明,积雪可由地表温度和地面类型得到实时控制。

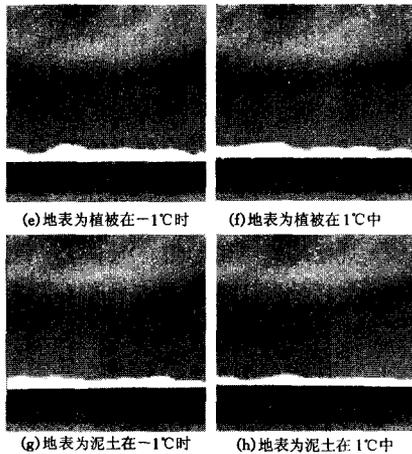


图 6 不同温度与地表植被雪场景剖面图

结束语 用衡量自然景物模拟的重要指标即真实性和实时性来考察所做的绘制工作:

1)将类衰减正弦曲线方程应用到视景飘雪模拟中,增强了整体效果的细致感,与粒子系统的完美结合,真实地再现了自然飘雪场景。与传统计算每个粒子的属性相比,提高了系统的实时性;

2)为更好模拟出不同地表以及不同温度对地表积雪密度的影响,引入积雪-融雪无损热传递方程,使场景仿真更加细致、真实,提高了系统的真实性。实验表明,本方法是合理且可行的。

3)GPU 的性能和可编程能力为计算机图形学的模拟提供了良好的平台,使系统在保证真实性的同时提高了实时性。

本方法便于推广,不仅可用于场景的模拟,更可用于真实自然灾害的预测和模拟,有效防范于未然。

进一步考虑飘雪场景中复杂的风场对雪粒子运动的影响,同时对积雪场景引入光照模型,考虑太阳辐射对温度的影响,能更有效地增强雪场景模拟的真实感。这些尚有待进一步探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] 宋成芳,于洋,杨颖振.数据驱动的大规模森林场景真实感动画[J].计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(8):1015-1022
- [2] 任鸿翔,尹勇,金一丞.大规模海浪场景的真实感绘制[J].计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(12):1617-1622
- [3] Rritter C. A local cellular model for snow crystal growth [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 23(4): 1111-1119
- [4] Gravner J, Griffeath D. Modeling snow crystal growth II: A mesoscopic lattice map with plausible dynamics [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(3): 385-404
- [5] Langer M S. A Spectral-particle Hybrid Method for Rendering Falling Snow [M]. Canada: McGill University, 2004
- [6] 陈华杰,余小清.基于粒子系统与 LOD 技术的实时雨雪效果模拟[J].计算机仿真,2008,25(4):491-494
- [7] Fearing P. Computer Modelling of Fallen Snow [A]// SIGGRAPH 2000[C]. 2000:37-46
- [8] 陈彦彦,孙汉秋,郭百宁.自然雪景的构造和绘制[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,22(1):916-922
- [9] Ohlsson P. Real-time Rendering of Accumulated Snow [D]. Sweden: Uppsala University, 2004: 1-19
- [10] Saltvik I. Parallel Methods for Real-time Visualization of Snow [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006: 218-227
- [11] 张东阳.基于温度变化与粒子系统的雪景模拟算法研究与实现[D].河北:燕山大学,2008:26-40
- [12] 黄庚,苏正军.冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析[J].应用气象学报,2007,18(4):561-567
- [13] Stanley H E. Two-dimensional polymers and conformal invariance [J]. Physic A, 1990, 163(1): 158-182
- [14] 范爱武,刘伟.不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟[J].太阳能学报,2003,24(2):167-171
- [7] Gale W A, Church K W. A program for aligning sentences in bilingual corpora [J]. Computational Linguistics, 1993, 19(1): 75-102
- [8] Kay M, Roscheisen M. Text-translation alignment [J]. Computational Linguistics, 1993, 19(1): 121-142
- [9] Wu D. Aligning a parallel English-Chinese corpus statistically with lexical criteria [A]// Proceedings of the 32th Annual Conference of the Association for Computational Linguistics. Las Cruces [C]. NM: ACL, 1994: 80-87
- [10] 张艳,柏冈秀纪.基于长度的扩展方法的汉英句子对齐[J].中文信息学报,2005,19(5):35-36
- [11] 李维刚,刘挺,张宇,等.基于长度和位置信息的双语句子对齐方法[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(5):689-692
- [12] Haruno M, Yamazaki T. High-performance bilingual text alignment using statistical and dictionary information [C]// Proceedings of the 34th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. 1996: 131-138

(上接第 218 页)

- [3] Fattah M A, Ren Fuji, Shingo K. Adaptive Threshold Parameters for Bilingual Dictionary Extraction from the Internet Archive [J]. International Journal of Information, 2005, 8(1): 165-175
- [4] Dejean H, Gaussier E, Sadat F. Bilingual Terminology Extraction: An Approach based on a Multilingual Thesaurus Applicable to Comparable Corpora [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Computational Linguistics COLING. Taipei, Taiwan, 2002: 218-224
- [5] Chuang T C, Yeh K C. Aligning Parallel Bilingual Corpora Statistically with Punctuation Criteria [J]. Computational Linguistics and Chinese Language Processing, 2005, 10(1): 95-122
- [6] Brown P F, Lai J C, Mercer R L. Aligning sentences in parallel corpora [A]// Proceedings of 29th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics Berkeley [C]. CA: ACL, 1991: 169-176