

飘雪场景的实时模拟*

王长波⁺, 王章野, 夏添, 彭群生

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

Real-Time Simulation of Snowing Scene

WANG Chang-Bo⁺, WANG Zhang-Ye, XIA Tian, PENG Qun-Sheng

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

+ Corresponding author: Phn: +86-571-87951045, E-mail: cbwang@cad.zju.edu.cn, <http://www.cad.zju.edu.cn>

Received 2004-04-05; Accepted 2004-07-05

Wang CB, Wang ZY, Xia T, Peng QS. Real-Time simulation of snowing scene. *Journal of Software*, 2004, 15(Suppl.):278~286.

Abstract: Realistic simulation of natural scene has been one of the most challenging tasks in compute graphics. And it is even more difficult to real-time simulate snowing scene because the complex modeling of wind field and the interaction between wind and snow are involved. In this paper, based on the fully consideration of the physical characteristics of wind and snow, a three-dimensional wind field is constructed by discretizing the classic Boltzmann equation. According to the interactive laws between wind and snow, the changing rules of snow's falling, deposition and erosion are then established. Finally, by adapting a series of simplification and accelerating rendering techniques, realistic wind-driven snow scenes under different speeds of wind with different snow falling amount are rendered in real time.

Key words: snowing scene; real-time simulation; boltzmann equation; wind field

摘要: 自然景物的真实感模拟一直是计算机图形学中的一个富有挑战性的课题,而飘雪场景的实时模拟尤为困难,因为它涉及到复杂的风场建模和风雪的交互作用.在充分考虑风雪具体物理特性的基础上,通过对经典 Boltzmann 方程进行离散来构造三维风场,并根据风雪的交互作用规律,建立起雪的飘动、沉积、侵蚀等变化规则,进一步采用一系列简化和加速绘制的方法,具有真实感地实时绘制出不同风速下不同降雪量的风雪场景.

关键词: 飘雪场景;实时模拟;Boltzmann 方程;风场

真实感自然景物的实时建模与绘制一直是计算机图形学研究的热点和难点之一,如地形、树木、花草、云、烟、雾、火焰等的模拟至今尚无统一的方法.与其他自然景物相比,雪景有着其独特的魅力,满天飘舞的雪花常

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60033010 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312101 (国家重点基础研究发展规划(973)); the National Natural Science Foundation of China and Research Grant Council of Hong Kong (国家自然科学基金会 NSFC-RGC 联合资助项目)

作者简介: 王长波(1976-),男,湖北随州人,博士生,主要研究领域为真实感图形学,多光谱成像仿真;王章野(1965-),男,博士,副教授,主要研究领域为红外成像仿真,多光谱图像信息融合,虚拟现实;夏添(1981-),男,硕士生,主要研究领域为真实感图形学;彭群生(1947-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为真实感图形,虚拟现实,红外成像仿真,基于点的造型与绘制,科学计算可视化.

常给人一种无与伦比的美感,因此飘雪场景是计算机动画、游戏、影视特技等领域必不可少的模拟场景之一;同时,对风雪交互作用的真实感模拟也有助于预防雪崩、保护山区设施和防止积雪。

由于雪花自身很轻,雪花随风飘动时受到风场及涡流等的交互作用,其飘动过程既具有一定的规律性,又有很大的随机性,非常复杂,而雪在地面上的沉积也受到诸多因素的影响,因此采用传统的图形学方法构造和绘制风雪场景难度很大。

至今为止,模拟冬天雪景的研究工作还不太多.Reeves 等人^[1]最早采用粒子系统来模拟降雪,但由于规则简单,构造的场景真实感不强.Nishita 等人^[2]采用 Metaball 来构造和绘制积雪场景,并模拟了光线在雪表面的散射;Fearing^[3]介绍了一个复杂的积雪模型和稳定性模型来构造由几何面表达的雪,绘制出迄今为止最漂亮的虚拟积雪场景,但其建模过程和场景数据非常复杂,绘制速度很慢.Premoze 等人^[4]在绘制阿尔卑斯山时考虑了高山的积雪构造,但由于尺寸大,绘制效果比较粗糙.陈彦云等人^[5]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.Ohlsson 等人^[6]采用深度图片来计算地面上每个网格处雪的数量,并进行遮挡剔除,较快地绘制出积雪场景,但需要大量的预处理工作.Felman 等人^[7]通过求解三维 N-S 方程来模拟雪在地面上的沉积效果,但其真实感尚嫌不足.Haglund 等人^[8]用三角面片来模拟雪片,并通过计算一个记录每个采样点雪高度的矩阵来模拟雪的沉积过程.Thomas 等人^[9]对雪在大型建筑物周围的沉积效果进行了数值模拟。

上述工作大都侧重于积雪效果的模拟,对飘雪场景及风雪的交互作用则很少涉及.目前对飘雪场景和风雪交互作用的研究主要限于数值模拟,如 Sumner 等人^[10]通过不同高程的压力来计算雪沉积对地面形状的影响,着重于物理特性的模拟;Masselot 等人^[11]分析了风对雪的作用,但仅限于二维,而且没有给出较为逼真的模拟场景;Corripio 等人^[12]对雪在风的作用下的飘移效果进行了简单的数值模拟.Langer 等人^[13]采用三维逆傅立叶变换对场景图像进行处理,并用一系列二维图像序列重建出下雪的场景,但该方法实际上是一种图像处理的方法,由于没有考虑风雪的交互作用,真实感不强.对于风场的模拟,Yoakum^[14]等人模拟了羽毛在风中的运动;Jakub^[15]等人建立了一个基于空气动力学的风场模型,但计算量较大。

本文在充分考虑风雪具体物理特性的基础上,对经典的 Boltzmann 方程进行离散,建立了基于微观动力学的三维风场模型,并在综合考虑风雪交互作用的基础上,给出了风对雪的传输、侵蚀机理及雪的沉积规则,并经过适当的简化加速,实时地绘制出不同大小、不同风速下真实感的风雪场景。

本文第 1 节描述风场模型的构造方法.第 2 节讨论风雪交互场景的建模.第 3 节是风雪场景的实时绘制方法.第 4 节给出本文方法模拟的不同情况下飘雪场景的部分结果.最后是结论和将来工作的展望。

1 风场模型的构造

在研究风雪场景的计算机模拟时,风场模型的建立是最重要的环节.目前研究宏观风流场的动力学特性一般有两种不同的途径^[16].一种途径是采用时间和空间上均连续的流体力学方程,其中最经典的是 Navier-Stokes 微分方程.由于 Navier-Stokes 方程组是非线性方程组,在很多情况下都难以求出解析解,对要考虑涡流和风雪交互作用的风场模拟更为困难.另一种途径是以统计物理学为基础的微观力学的方法.这一方法是从流体由大量的微观粒子所构成的这一事实出发,认为流体的宏观特性是这些大量微观粒子运动的统计平均结果.其中最典型的是 Boltzmann 方程.由于 Boltzmann 方程是从微观动力学的角度来描述的,它比从连续介质假设导出的 Navier-Stokes 方程有更深的物理内涵。

但是,Boltzmann 方程求解起来也比较困难,为此我们引入离散运动论的思想,即把时间和空间完全离散,将风流场划分为网格,让 Boltzmann 方程中的粒子分布函数沿网格线运动,并在网格点上根据一定的规则相互碰撞.这样,不同运动方向粒子的密度变化在宏观上反映了风场的分布及运动。

据此,无外力项的离散 Boltzmann 方程为

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + e_i \cdot \nabla f_i = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i), \quad i=1, \dots, b \quad (1)$$

式中, e_i 为粒子运动速度; f_i 是当前的粒子数分布函数,表示以速度 e_i 运动的粒子数.每个离散粒子可有 $b+1$ 个运动方向,其中 $e_0=0$ 对应于静止粒子.该式右项被称为 BGK 碰撞项,反映粒子间相互碰撞的影响.根据

Boltzmann 的 H 定理^[16],处于非平衡态的系统总是以绝对的优势几率趋向平衡态,即由于粒子的运动和碰撞,其分布函数在离散的时间步上从一个格点移动到另一格点,且弛豫地趋于平衡,并在该过程中遵守质量和动量守恒.在上式中, f_i^{eq} 即称为局部平衡分布函数; τ 是弛豫时间,反映了非平衡态趋向平衡态的快慢.

如果采用二维米字形格子,即离散粒子可以沿着如图 1 所示的 8 个方向运动,也可以在 0 处静止不动.这样,式(1)具体可写成

$$f_i(t + \Delta t, x_\alpha + \bar{c}_i \Delta t) - f_i(t, x_\alpha) = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq}(t, x_\alpha) - f_i(t, x_\alpha)), \quad i = 0, 1, 2, \dots, 8 \quad (2)$$

这里, $f_i(t, x)$ 的定义是:在时刻 t , 位置 x 处,运动速度为 \bar{c}_i 的粒子数密度, Δt 是粒子沿网格空间运动的时间步长.

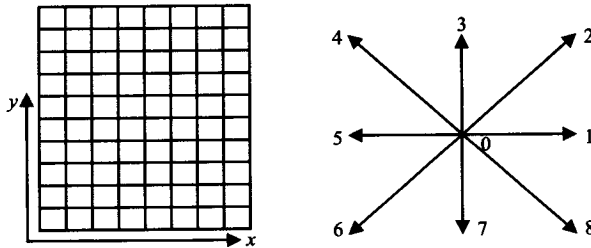


图 1 二维网格剖分及离散速度向量

分布函数 f_i 在不同离散方向上的变化反映了整个风场的分布,其随着时间的改变可表示风场的变化.则在每个格位处,风场流体的密度 ρ 和宏观速度 u 可用分布函数表示如下^[11]:

$$\rho(x, t) = \sum_{i=0}^8 f_i(x, t), \quad \mu_\alpha(x, t) = \frac{1}{\rho} \sum_{i=0}^8 \bar{c}_{i\alpha} f_i(x, t) \quad (3)$$

根据空气粒子在运动过程中满足质量和动量的守恒,同时考虑到米字型网格的对称性规律,我们可以确定局部平衡分布函数 f_i^{eq} ,从而通过离散的 Boltzmann 方程构造出风场模型.

不难证明,从上面推导出的离散微观动力学方程可以恢复出如下的宏观动力学方程(证明略):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mu \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \mu}{\partial t} + \mu \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} = -g \frac{\partial \rho}{\partial x} + f v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \mu \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \rho}{\partial y} - f \mu \end{cases} \quad (4)$$

式(4)即经典的空气动力学连续方程 Navier-Stokes 方程.同时 Navier-Stokes 方程是 Boltzmann 方程的低阶近似^[17],因此我们的离散风场建模方法完全可以逼真地模拟风场的连续变化.该方法继承了原 Boltzmann 方程的物理本质,在保留了离散运动论的简单性优点的同时,又克服了其非伽利略不变性和计算噪声等缺点,具有精度高、并行性能好、容易考虑微观的动力机制等优点.

2 风雪场景的建模

2.1 风的建模

风雪场景的建模可以分为两个主要组成部分:风场的建模;雪的建模及其与风的交互作用.

2.1.1 三维风场模型

由于我们要模拟的是真实感的风雪场景,所以将上面的风场构造方法扩展到三维.如图 2 所示,将三维空间离散成网格,总的格点数是 $N_x \times N_y \times N_z$,在每个网格格点处,风场分布用 $F_i(r, t)$ 表示, r 是格点, t 代表时间,风流体可能沿 i 个方向运动, F_i 是沿 i 方向运动的流体密度, \bar{c}_i 表示方向.这里我们采用如图 2 所示的模型,即网格离散速度的方向从 $i=0$ 到 $i=14$.每个格点处的风粒子方向 \bar{c}_i 的取值如下^[17]:

$$\bar{c}_i = \begin{cases} (0,0,0), & i = 0, \text{静止粒子} \\ (\pm 1,0,0), (0,\pm 1,0), (0,0,\pm 1), & i = 1,2,\dots,6; \text{Group I} \\ (\pm 1,\pm 1,\pm 1), & i = 7,8,\dots,14; \text{Group II} \end{cases} \quad (5)$$

每个格位处的风流场密度为

$$\rho = \sum_{i=0}^{14} F_i,$$

速度场为

$$\mu = \frac{1}{\rho} \sum_{i=0}^{14} F_i \bar{c}_i. \quad (6)$$

与式(2)类似,三维离散的风场动力学模型以下式表达:

$$F_i(r + \bar{c}_i, t + \Delta t) = F_i(r, t) + \frac{1}{\xi} (F_i^{eq}(\mu(r, t), \rho(r, t)) - F_i(r, t)) \quad (7)$$

其中 ξ 是张弛时间,一般取为 0.5 左右, $F_i^{eq}(\mu, \rho)$ 是平衡分布:

$$F_i^{eq}(\mu, \rho) = \omega_i \rho \left[1 + \frac{\bar{c}_{i\alpha} \mu_\alpha}{c_s^2} + \left(\frac{\bar{c}_{i\alpha} \mu_\alpha}{c_s^2} \right)^2 - \frac{\mu_\alpha \cdot \mu_\alpha}{2c_s^2} \right], \quad i = 0,1,\dots,14 \quad (6)$$

式中, $\bar{c}_{i\alpha}$ 代表网格方向矢量 \bar{c}_i 的空间坐标分量 α , $c_s^2 = \frac{1}{3}$, 待定参数 ω_i 的取值如下:

$$\omega_i = \begin{cases} 2/9, & i = 0, \text{静止粒子} \\ 1/9, & i = 1,2,\dots,6; \text{Group I} \\ 1/72, & i = 7,8,\dots,14; \text{Group II} \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 边界条件

风的运动可能会受到地形、建筑物、障碍物(挡风墙)等影响,因此我们按照如下方法设置边界条件:

(1) 上边界.上边界即天空,在上边界处,垂直方向速度是 0,水平方向速度不限.具体地,当到达上边界时,我们只需将垂直方向速度改为 0 即可: $\mu_{vert} \leftarrow 0$.

(2) 左右边界.在离散空间的两边,我们设置为开放边界,即速度不限制: $\mu_{hor} \leftarrow \mu_\infty$, 并允许风经过足够长的时间来达到平衡速度,这与实际情况相符.

(3) 地面.这包括山区突出的地形、建筑及人为设置的挡雪墙等.该边界处的格点为坚实格点,即该格点所有粒子的动量始终为 0.我们将这类边界设置为反弹边界,具体地,在此类边界处我们将每个格点处所有运动着的粒子的 F_i 取反,即 $F_i(r_{solid}, t) \leftarrow F_{i-(-1)^{\text{mod}2}}(r_{solid}, t)$.

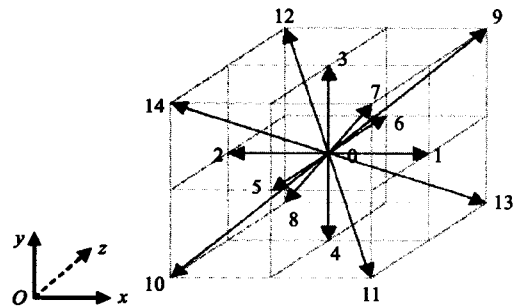


图 2 三维风场离散速度向量

2.2 雪的建模

风中飘舞的雪主要受到 3 种力作用:重力、风的作用力和雪粒子之间的碰撞力.由于雪粒子众多且发生碰撞的几率较小,这里暂不考虑雪粒子之间的碰撞,而重力始终向下的,我们用 mg 来描述,下面着重研究风对雪的作用.

在降雪期间风的影响是很大的,风对雪的影响主要体现在以下几个方面^[18]:

- 雪在风中的飘舞飞行,包括随风的规则运动和不规则运动;
- 雪粒子沿地面的飘移跳动,主要指发生在地表 30cm 风对雪的传输;
- 雪粒子受到的风的侵蚀作用,即强风旋涡在跳动层捕捉雪粒子,并传输到较远的地方.

在第 2.1 节所述的同一网格处,我们定义另一种粒子 $S_i(r, t)$ 来代表雪.可通过这些雪粒子与风粒子的相互作用

用,并依据一组说明沉积、碰撞、粘结力、侵蚀和重力作用等的局部演化规则,来模拟雪粒子和风粒子互相影响,从而再现雪在风中的飘动、旋转、“飞翔”等效果。

用 $S_i(r,t)$ 表示每个网格格位上雪粒子的分布, $i \in 0,1,\dots,14$, S_i 为整数,它等于第 i 方向上运动的粒子数 (S_0 表示粒子保持静止状态)。

根据风对雪的作用规律,雪粒子和风粒子间相互作用的规则主要有风对雪的传输机制、侵蚀规则和雪的沉积规则 3 种,下面分别加以讨论:

(1) 风对雪的传输

如果忽略惯性作用,则可以假定雪粒子完全随着风的速度场 $\mu(r,t)$ 运动,并受重力作用。重力的主要作用是把垂直降落速度 $-\mu_g$ 加到悬浮的雪粒子上。这样,格位 $r = (r_x, r_y, r_z)$ 的雪花大致经 τ 时间单元运动到 $r' = (r'_x, r'_y, r'_z)$:

$$r'(t+\tau) = r(t) + (\mu - \mu_g)\tau, \text{ 即 } r'_x = r_x + \mu_x\tau, r'_y = r_y + \mu_y\tau, r'_z = r_z + (\mu_z - \mu_g)\tau, r'_x = r_x + u_x\tau, \quad (8)$$

但是,按这种方式计算出来的 $r'(t+\tau)$ 不一定正好对应于三维空间的网格格点,因此这里我们把粒子的传输看作概率过程,有 $r(t+\tau) = r(t) + v_i\tau$, 式中 v_i 为与图 2 中立方体网格有关的 14 个速度矢量之一。对于每个粒子运动,选择一个 v_i , 格位 r 处雪花的运动即该格点所有粒子的平均:

$$\langle r(t+\tau) - r(t) \rangle = (\mu - \mu_g)\tau \quad (9)$$

具体地,在 xoy 平面,我们首先假定 $|\mu - \mu_g| < v$, 式中 $v = (\lambda/\tau)$ 为网格上允许的最大速度,然后,引入 4 个运动概率 P_x, P_{-x}, P_y, P_{-y} , 分别对应于沿 x 或 y 轴的正、负方向的运动:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \max\left(0, \frac{v_1 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2}\right), & P_{-x} &= \max\left(0, \frac{v_5 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2}\right) \\ P_y &= \max\left(0, \frac{v_3 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2}\right), & P_{-y} &= \max\left(0, \frac{v_7 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因为 $v_1 = -v_5$ 和 $v_3 = -v_7$, 故不可能有 P_x 和 P_{-x} 同时非零(对 P_y 和 P_{-y} 同样)。即雪花要么在 x 方向走一步,要么在 y 方向走一步。

为了用这种方法选择粒子的运动走向,选择在区间 $[0,1]$ 均匀分布的 2 个随机数 q_x, q_y 。如果 $q_x < P_x$ (或 $q_x < P_{-x}$), 则粒子将沿 x 方向运动(或 $-x$ 方向运动);相反,如果 $q_x > P_x$ (或 $q_x > P_{-x}$), 则粒子不允许粒子沿水平方向运动。

那么在 xoy 平面,雪花粒子的平均速度 $\langle v \rangle$ 为

$$\langle v \rangle = P_x v_1 + P_{-x} v_5 + P_y v_3 + P_{-y} v_7$$

因为 P_x 和 P_{-x} 必有一个为 1, 一个为 0 (P_y , 也 P_{-y} 是一样), 且 $v_1 = -v_5, v_3 = -v_7$, 同时 v_1 和 v_3 是正交的, 则

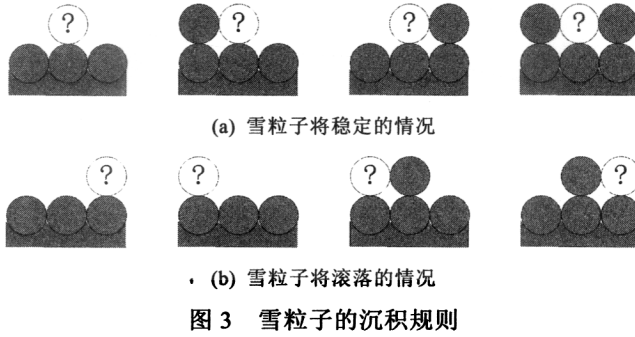
$$\langle v \rangle = \left(\frac{v_1 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2} \right) v_1 + \left(\frac{v_3 \cdot (\mu - \mu_g)}{v^2} \right) v_3 = \mu - \mu_g \quad (11)$$

上式表明,虽然飘动的雪粒子在网格上运动,但其平均位置是随着预期的速度流 $\mu - \mu_g$ 而变化。

对于 y 轴和 z 轴的运动,可采用完全相同的算法。这样,既模拟了雪飘动的随机性,又保证了雪粒子的飘动在宏观上的物理准确性。当在一个格位有许多雪粒子时,对每个粒子都重复上述过程。

(2) 沉积

沉积是风雪模拟的重要部分。在模型中,网格格位的状态要么坚实的,如地面“硬”土或已完全沉积的雪;要么是空的,即在此格位处风流体和雪粒子还可以运动。随着雪粒子的飘落,其最终到达地面,这时它可能沿着地面轨迹线滚动,也可能稳定下来,堆积并改变地面的形状。具体堆积规则如图 3 所示,对于如图 3(a)所示的 4 种情况,最上面的粒子将稳定下来;而对于如图 3(b)所示的 4 种情况雪粒子将滚落下来。由于雪粒子众多,这里采用多粒子模型,即只有当某个格位接收到的粒子数大于一个指定的阈值时(可取 10),该格位才变成与地面一样的坚实格位。考虑到实时绘制的要求,对于雪沉积时的不稳定变形、坍塌等复杂情况暂不作考虑。



(3) 侵蚀

在一定条件下,风可能刮走一些已沉积的雪粒子,即当满足适当的侵蚀条件时,坚实的雪粒子在竖直方向上被风以随机的速度驱逐.在侵蚀过程中,一方面雪粒子被速度很快的风粒子推着移动,另一方面飘动的雪粒子也减少了风粒子的粘滞度,从而使侵蚀变缓.

我们用侵蚀面的风速来表达侵蚀速率^[11]:

$$\theta = \theta_c (C_{sat} - C_{salt}) \tag{12}$$

这里, θ 是侵蚀速率,侵蚀系数 $\theta_c = \frac{h}{t_{sat}}$, h 是跳跃层的高度, t_{sat} 是达到饱和的时间, C_{sat} 是跳跃层的粒子饱和度, C_{salt} 是当前粒子的饱和度.饱和度定义为

$$C_{sat} = eff \left(1 - \frac{u_s^2 - thresh1}{u_1} \right) \tag{13}$$

这里, eff 是传输率, $u_{s-thresh1}$ 是风速的阈值,一般取 4, u_1 是当前风速.

3 风雪场景的实时绘制

3.1 风和雪的造型

现实世界中雪花的形状很多,而且十分美丽,如图 4 所示就是我们常见的雪花的形状.但考虑到本系统中的雪粒子可能有成千上万个,为了能够实时模拟雪花的飘动效果,我们采用最简单的几何体来表示雪花粒子,主要有以下两种构造方法:

(1) 采用简单的球形.此时球中心的坐标为该雪粒子的位置,球的颜色灰度从中心到边缘是按高斯分布渐进地变化,球的半径按照一定的概率来取,即给一个随机数 r ,球的半径 R 取: $R=r+1$,由于雪花的大小一般不会大于 10mm,故 r 为 [0,4] 之间的整数.此雪花飘落到地面时,当某处沉积的雪花数大于某阈值时,此处的雪花才联结成一坚硬的雪块.

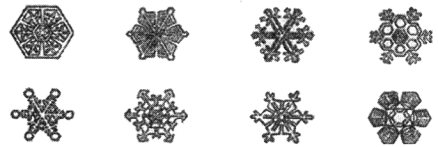


图4 雪花形状

(2) 采用更逼真一些的梅花形.可以将如图 4 所示的梅花形状作为纹理,采用 Billboard 技术来快速绘制每个雪花.我们可以根据场景不同选择不同造型方法.这样既保证了计算的快速性,又具有较强的真实感.

风没有具体形态,我们可以通过风速和风向来表征.由于风传输机制的复杂性,风速在一般情况下不是始终恒定不变的,即同一级别的风也会时大时小,有很大的随机性.为此,我们设风速由两个部分组成:平均风速 \bar{v}_w 和随机风速 \tilde{v}_w ,即风速为 $v_w = \bar{v}_w + \tilde{v}_w$,平均风速可以采用气象学中测得的风速数据,随机风速取值如下:

$$\tilde{v}_w = \mu \bar{v}_w \sin \alpha, \alpha \in [0, \pi] \tag{14}$$

这里, μ 是随机系数,其随着风速的增大而增大,此处取 $\mu = n/20$, n 为风的风级, α 为相位角,为取值在 [0,180] 之间的一个随机数,从而增加了模拟的逼真性.

空间风场的建立,一般通过改变空间网格格点处不同方向的风粒子密度来实现.三维风场的建立主要有两种方式:一次性加入和渐进式加入.

(1) 一次性加入,即将风速 V_w 一次性加到边界格点上,急风场可以采用这种方式建立.具体地,对于每个要加入风的格点,按不同的权因子增加不同运动方向的风粒子密度,假设该格点某时刻密度为 ρ ,要建立风场的风向为 \vec{C}_w ,此格点每个方向 i 上的风粒子密度改变量为 $\Delta F_i, i = 0, 1, \dots, 14$ (如图 2 所示),则可取 $\Delta F_i = \lambda_i \varepsilon_i \rho V_w$,其中 λ_i 的取值为

$$\lambda_i = \begin{cases} 1/4, & \Delta c_i = 0 \\ 1/6, & \Delta c_i \in (0, \pi/2), \\ 0, & \Delta c_i = \pi/2 \end{cases}, \quad \varepsilon_i = \begin{cases} 1, & \Delta c_i \in [0, \pi/2] \\ -1, & \Delta c_i \in (\pi/2, \pi] \end{cases}$$

这里 Δc_i 为 \vec{c}_i 与 \vec{c}_w 的夹角, \vec{c}_i 为图 2 中的 15 个离散速度方向.由如图 2 所示的具体方向以及格点密度和动量的计算公式(6),可计算出整个格点的速度增加为 $\Delta u = V_w$;密度增加为 $\Delta \rho = 0$,即在保证质量守恒的情况下将风速 V_w 加到了该格点.

(2) 渐进式加入,以一定的加速度 a ,经过时间 t 逐渐将风速 V_w 加入, $V_w = at$,此种方式适用于较缓的风场建立.即每经过 Δt 时间步,将大小为 $a\Delta t$ 的风速加到边界格点上,具体方法与第(1)种方式类似.

3.2 场景绘制

风雪场景绘制的初始化包括以下几个方面:(1) 空间网格剖分:按照如图 2 所示的方式设置好坐标系,将空间剖分成 $(N_x \times N_y \times N_z)$ 的网格;(2) 风场的初始化:设置每个格点处的初始动量为 0,初始密度按照局部平衡规则设置,即每个方向粒子的密度为 $\omega_i \rho_0$,这里 ω_i 按照式(7)取, ρ_0 是风流体的初始密度;(3) 雪粒子的初始化:我们可以设置雪粒子从左边和上面格点处以一均匀分布的概率不断地加入.概率分布的统计平均性,保证了雪花在空间分布的均匀性;(4) 边界状态设置:按照第 2.1.2 节的方式设置好各类边界状态.

然后按第 3.1 节的方法建立风场,随着时间的变化,每个格点处风粒子的状态将随着第 2.1 节的规则变化,同时每到下一时刻,将最右一列格点处刚出边界的风回加到最左一列的边界格点,这样构造一个循环风场,以保证整个风场总的质量和动量平衡;雪将随着风的状态按照第 2.2 节的规则飘动、沉积,从而模拟出整个风雪场景.在仿真过程中交互地改变风的大小、方向,可以模拟不同条件下的飘雪场景.为了使场景更逼真,我们导入一个三维地面场景,同时采用环境映照的方法绘制天空背景.

为了加快绘制速度,我们还采用了 OpenGL 的显示列表来加速运算,同时将如图 3 所示雪粒子的沉积规则的 8 种情况在绘制之前进行预处理,存成一个查找表,在绘制时实时调用.

4 结 果

我们在浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的 P4 2.5GHz,2.0GB 内存的微机,用此算法绘制风雪场景(尺寸为 $600 \times 400 \times 200$),平均绘制帧数达 25 帧/秒,达到了实时的要求.部分模拟效果如图 5 和图 6 所示,其中图 5(a)为某晴天场景,图 5(b)~图 5(d)分别为对应的不同大小降雪量的场景,图 5(e)和图 5(f)为模拟的另一风雪场景,其中雪粒子分别用球形和梅花形绘制,图 5(g)和图 5(h)为模拟的不同风速风向的另一风雪场景,从算法运行时实时生成的动态画面中可以看到,效果比较逼真;图 6(a)~图 6(e)分别为本文算法所模拟的不同时刻雪的沉积侵蚀效果图,此时风是从左向右吹,风速 4.5 级,可以看到在房顶的向风侧,雪的沉积较多,而在房子左侧的墙角处雪的沉积也较多,这是由于房子的阻挡造成风的回旋而使较多的雪在此处沉积,同样的在房子右侧由于山坡的阻挡造成风的回旋而沉积了较多的雪;图 6(f)图是没有风的情况,此时雪在两边的沉积是一样的.可见我们提出的风场模型及风雪交互作用规则是合理的,模拟的效果也很逼真.

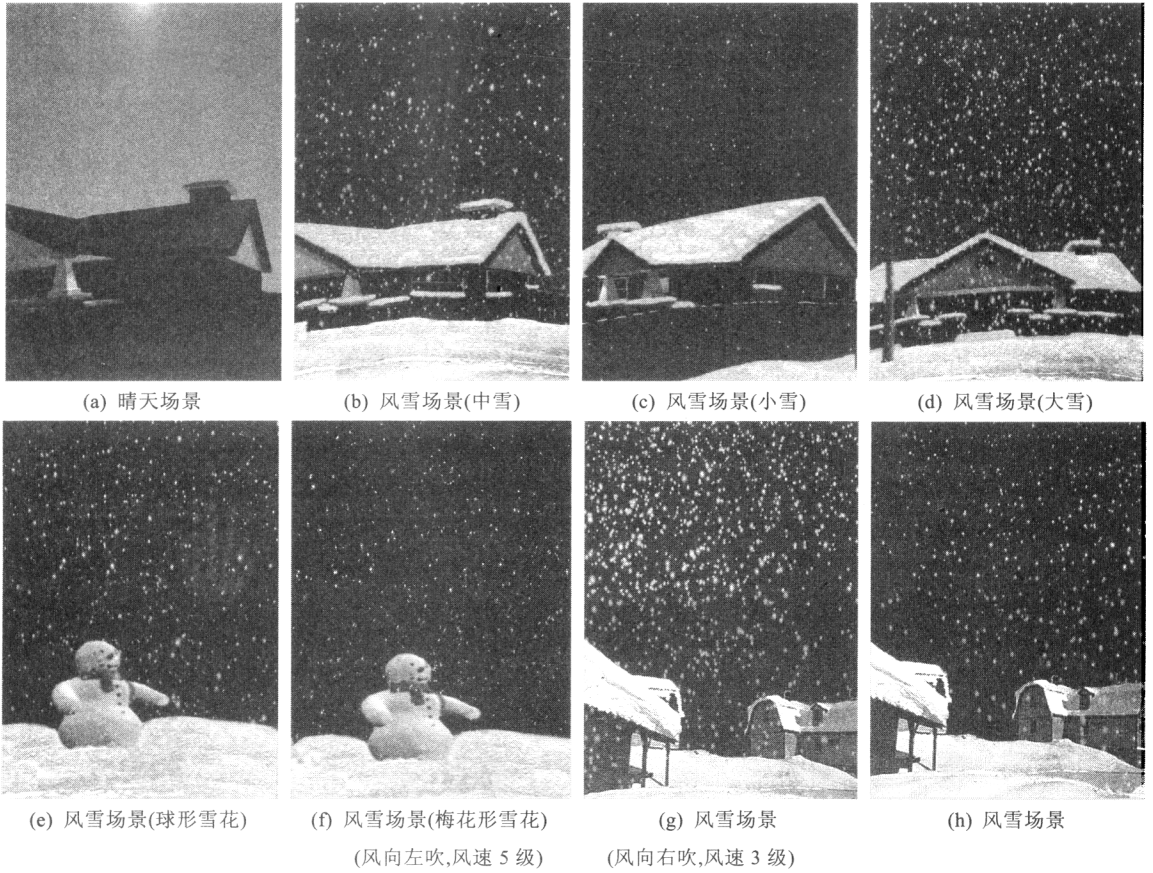


图 5 不同的飘雪场景模拟

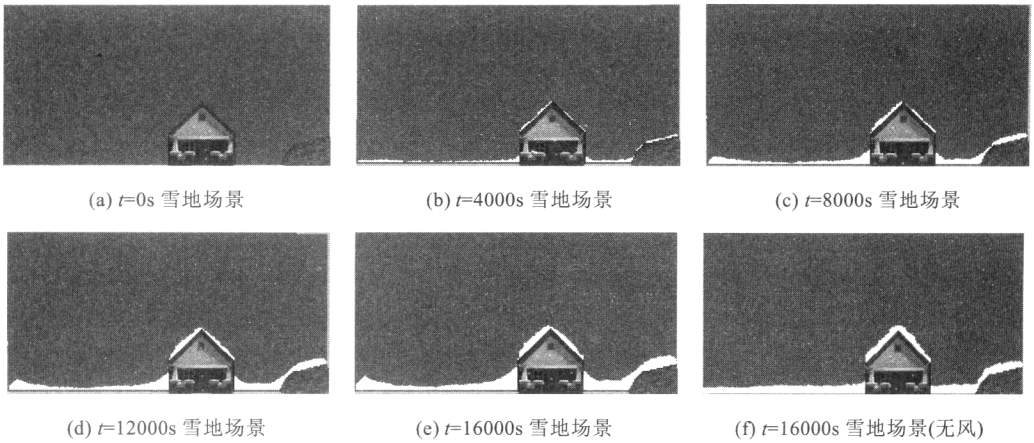


图 6 雪的沉积侵蚀效果模拟

5 结 论

本文从风雪的物理特性出发,提出了一种模拟风雪场景的方法,即对经典的 Boltzmann 方程进行离散构造三维风场,并根据风雪的交互规律,建立了雪的飘动、沉积、侵蚀等变化规则,最后绘制出不同大小、不同风速下的风雪场景.由于考虑了风场的空气动力学性质和风雪的物理性质,绘制出的风雪场景很逼真.同时由于采用一系列离散简化和加速绘制方法,最终实现了飘雪场景的实时绘制.

进一步的工作有:改进和完善风雪的物理模型,包括提供直观方便的交互手段;进一步考虑雪花的碰撞及雪花对风的作用,增强场景真实感;研究多分辨率条件下风雪造型及显示的方法,进一步提高绘制效率等。

References:

- [1] Reeves WT, Ltd L. Particle systems—A technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Trans. on Graphics*, 1983,2(2): 359~367.
- [2] Nishita T, Iwasaki H, Dobashi Y, Nakamae E. A modeling and rendering method for snow by using metaballs. *Computer Graphics Forum*, 1997,16(3):357~364.
- [3] Fearing P. Computer modeling of fallen snow. In: Akeley K, White J, eds. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000*. New Orleans: ACM, 2000. 37~46.
- [4] Premoze S, William B, Peter S. Geospecific rendering of alpine terrain. In: Post F, Gobel M, eds. *Proc. of the 10th Eurographics Workshop on Rendering*. Granada: Eurographics Association, 1999. 107~118.
- [5] Chen YY, Sun HQ, Guo BL, Wu EH. Modeling and rendering snowy natural scenery. *Chinese Journal of Computers*, 2002,25(9): 916~922 (in Chinese with English abstract).
- [6] Ohlsson P. Real-Time rendering of accumulated snow [MS. Thesis]. Uppsala University, 2004.
- [7] Feldman BE, O'Brien JF. Modeling the accumulation of wind-driven snow, technical sketch. In: Mania K, ed. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2002 Conf. Abstracts and Applications*. San Antonio: ACM, 2002. 12.
- [8] Haglund H, Andersson M, Anders H. Snow accumulation in real-time. In: Ollila M, ed. *Proc. of the Sigrad 2002*. Norrkoping: Linkoping University Electronic Press, 2002. 11~15.
- [9] Thomas KT. Large scale studies of development of snowdrifts around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003,91:829~839.
- [10] Sumner RW, O'Brien JF, Hodgins JK. Animating sand, mud, and snow. *Computer Graphics Forum*, 1999,18(1):17~26.
- [11] Masselot A, Chopard B. Cellular automata modeling of snow transport by wind. In: Dongarra J, Madsen K, Wasniewski J, eds. *Proc. of the Applied Parallel Computing, Computations in Physics, Chemistry and Engineering Science (PARA)*. Lyngby: Springer Press, 1995. 429~435.
- [12] Corripio JG, Durand Y, Guyomarch G. Modelling and monitoring snow redistribution by wind. *Cold Region Science and Technology*, 2004,(5):63~89.
- [13] Langer MS, Zhang LQ. Rendering falling snow using an inverse Fourier transform. In: Rockwood AP, Hodgins J, eds. *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2003*. San Diego: ACM, 2003. 58~64.
- [14] Wei XM, Zhao Y, Fan Z, Li W, Yoakum S, Kaufman A. Blowing in the Wind. In: Breen D, Lin M, eds. *Proc. of the Eurographics/SIGGRAPH Symp. on Computer Animation 2003*. San Diego: Eurographics Association, 2003. 75~85.
- [15] Wejchert J, Haumann D. Animation aerodynamics. *Computer Graphics*, 1991,25(4):19~22.
- [16] Chapman S, Cowling TG. *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*. 3rd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- [17] Hazi G, Attila RI, Gusztav M, Istvan F. Lattice Boltzmann methods for two-phase flow modeling. *Annals of Nuclear Energy*, 2002, (29):1421~1453.
- [18] Mei RW, Wei SY, Yu DZ, Luo LS. Lattice Boltzmann method for 3-D with curved boundary flows. NASA/CR-2002-211657, Hampton: ICASE, NASA Langley Research Center, 2002. 1~21.

附中文参考文献:

- [5] 陈彦云,孙汉秋,郭百宁,吴恩华.自然雪景的构造和绘制. *计算机学报*, 2002,25(9):916~922.