

基于粒子系统的空气污染扩散模拟研究^①

朱 军^{②*} 林 琰* 徐丙立*

(* 香港中文大学太空与地球信息科学研究所 香港)

(** 西南交通大学土木工程学院测量工程系 成都 610031)

摘 要 通过基于粒子系统构建虚拟地理环境的方法进行了空气污染扩散的动态模拟研究。粒子系统将动态、模糊的污染物定义为微观粒子的集合,根据随机过程理论对污染气流扩散进行约束,从而实现在客观上对空气污染扩散的动态性和随机性的有效描述。该方法从粒子发射域、粒子运动、粒子绘制等关键环节,在满足视觉效果的前提下进行效率优化,并以珠江三角洲空气污染为案例,建立了虚拟地理环境原型系统,开展了空气污染动态扩散模拟,进行了实时交互查询与分析。实验结果证明,上述的方案能够达到模拟效果的逼真性和交互操作的实时性。

关键词 虚拟地理环境,空气污染,粒子系统,实时优化

0 引 言

当前空气污染已经成为最严重的环境问题之一,研究和防治空气污染是一项重要而紧迫的任务。采用交互式可视化手段来研究空气污染扩散对城市群地理环境带来的影响是一种有效的方法^[1]。但现有空气质量扩散模式计算的输出结果大都使用数据或用 Grads、Vis5D 等图形处理软件进行可视化表达,这种表达不仅可视化效果差,且很难有效地考虑地理环境因素(如进行交互查询和空间分析),此时,就需要借助于虚拟地理环境(virtual geographic environment, VGE)这一工具。虚拟地理环境是在融合地理信息系统(GIS)的基础上发展起来的,并在由空间数据共享提升到地理知识和经验共享的新型地理学语言框架的基础上提出的一门新型地理学语言^[2]。它以现实为基础,但又超越现实,构建与现实环境相似的虚拟地理环境平台,帮助人们认识世界和以综合的方法研究地理问题^[3,4]。虚拟地理环境追求场景模型的逼真和自然显示特性,能为参与者提供一种真实的交流氛围,有助于研究人员更好地进行地学分析^[5]。因此,基于虚拟地理环境开展空气污染扩散模拟研究,逼真地模拟气候环境与实时交互操作,对于相关专家及研究人员,尤其是非专业人员直观地了解污染区域的真实场景,以便科学制定应对措施,

具有十分重要的意义。

污染气流随不同的气象条件和周围环境呈现不同的流动形态,因此,其形态外观极不规则,而且极其复杂和随意,并随时间而变化。现有地理场景模型的构建,大多采用点、线、面的建模方式,如矢量和栅格数据模型,侧重表达地形地物等静态、确定边界的实体模型。而由 Reeves 于 1983 年提出的粒子系统(particle system)建模方法被认为是迄今为止最为成功的一种模拟动态变化的不规则物体的图形生成算法^[6]。与传统的点、线、面的建模方法相比,粒子系统从微观着手,将自然景物定义为微观粒子的集合,通过采用随机过程理论对微观运动的动态性进行约束,从而在宏观上达到对不规则模糊物体的动态性和随机性的描述^[7],如论文^[8]报道的应用粒子系统开展小区域的降雨以及水土流失的模拟研究。本文重点探讨基于粒子系统的动态建模方法去模拟空气污染扩散,取得逼真的可视化效果,同时通过对关键环节进行分析,开展大区域绘制的实时效率优化,最后以大珠三角区域为实验区域开发原型系统并进行初步实验。

1 基于粒子系统的空气污染扩散模拟

1.1 粒子系统基本原理

粒子系统把运动模糊物体看作由有限的具有确

① 863 计划(2006AA12Z207, 2009AA12Z207)及香港特区研究资助局基金(447807)资助项目。

② 男,1976 年生,博士,讲师;研究方向:虚拟地理环境, GIS;联系人, E-mail: vgezj@163.com
(收稿日期:2008-05-15)

定属性的流动粒子所组成的集合,单个粒子定义为实数域上的 n 维向量,即 $P^n = \{Attri_1, Attri_2, \dots, Attri_i, \dots, Attri_n \mid n \geq 3, n \in I\}$, 其中 $Attri_i$ 可表示粒子的各个属性,如质量、空间位置、外观(如颜色、亮度、形状、大小等)、运动属性(如速度、加速度)、生存周期等^[7]。这些粒子以连续或离散的方式充满它所处的空间,并处于不断的运动状态,粒子在空间和时间上具有一定的分布。虚拟场景中每个粒子均具有一定的生命周期,经历出生、成长、衰老和死亡的过程,在每一时刻(即场景绘制的每一帧)只有其中一部分粒子是“生存”的。随着时间的推移,已有的粒子不断改变形状、不断运动,过程中不断有新粒子加入、旧粒子消失,粒子诞生和死亡的规律必须在一定程度上符合建模对象的物理规律。为表达粒子系统的随机性,通常采用简化的随机过程来控制粒子在它所在系统的形状、特征及运动。对每一粒子参数均要确定其变化范围,然后在该范围内随机地确定它的值,而其变化范围则由给定的平均期望和最大方差来确定,其基本表达式为^[6]:

$$Parameter = MeanParameter + Rand() \times VarParameter \quad (1)$$

其中 $Parameter$ 代表粒子系统中的任一需要随机确定的参数, $Rand()$ 为产生在 -1 到 1 之间的均匀随机函数, $MeanParameter$ 为平均期望, $VarParameter$ 为其方差。

1.2 大气污染扩散模型

城市群模拟的典型尺度在数十公里到数百公里,模式中除考虑污染物的传输、扩散外,还要考虑污染物的迁移和转化,常见的有欧拉型 K 模式、欧拉和拉格朗日混合型 K 模式^[9]。本文采用三维多尺度的欧拉型扩散模式,它是在对美国宾州大学和美国大气科学研究中心研制的 MM5 中尺度模式进行改进和在气象场模拟的基础上建立的一个三维实时扩散模式(SYSUM)。在该模式中,仅考虑高架点源扩散的单一气态污染物 SO_2 ,并假设在大气中没有参与任何化学反应(不加入化学模式),集中讨论影响污染物的平流扩散过程。SYSUM 模式是一个三维多尺度的在线的欧拉型扩散模式,能够模拟对流层中单一气态污染物的扩散。SYSUM 模式气象场模拟的动力框架是由 MM5 模式组成,MM5 模式提供三维的模拟风场、温度、气压和湿度。而模式的污染物扩散传输部分采用污染物的质量连续方程来计算,包括平流、扩散、干湿沉降等过程,方程的形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ + Q - L \end{aligned} \quad (2)$$

其中 c 为污染物浓度, u, v, w 为风速的三维分量, K 为湍流扩散系数, Q 为源强, L 为干湿沉降项。在本研究中,暂时不考虑干湿沉降项 L 。

1.3 基于粒子系统的空气污染扩散模拟

与单个污染源相比,城市群区域的空气污染涉及的范围广,计算量大,目前通常的做法是借助超级计算机进行求解,设定时间间隔,输出结果数据。这样就把复杂的模型计算与结果可视化表达分开,否则会非常复杂和难以实现。根据要表达空气污染对象的效果要求,首先需要初始化粒子的位置、外观、运动、生存周期等属性,确定粒子的个体模型。粒子的初始位置由输出文件中的地理坐标确定,以此设定粒子的初始发射位置。由于一般空气污染输出的平面坐标单位为经纬度,在进行可视化表达时需要转换为地理场景的坐标,如本文转换为 WGS84 50N 投影坐标,高程为绝对高程,它们的单位为米。为了逼真地表达效果,可根据空气污染的浓度大小来指定不同的初始颜色和透明度,如浓度高的地方颜色深一些,透明度低一些。同时为了表达空气污染真实变化的表达,须依据相临两个时刻浓度来指定其变化的范围。粒子的形状可以是小球、立方体或其他形状,也可结合广告牌技术,用贴上纹理的小四边形作为基本粒子,以达到较好的效果。为了表示粒子的不规则性,在赋予粒子属性时分别加了扰动即方差,以计算粒子的大小和速度来说明。

粒子的大小决定生成图形的粗糙度和分辨率。粒子的大小 $size$ 计算公式如下:

$$size = avSize + Rand() \times sDisturb \quad (3)$$

其中 $avSize$ 是粒子的平均大小,它的取值与要表达现象的强度有关; $sDisturb$ 是粒子大小的扰动方差。

对空气污染粒子的运动速度,风场是主要的干扰因素。由于欧拉型扩散模式主要讨论影响污染物的平流扩散过程,故本文仅考虑水平风速 $windSpeed$ 和水平风向 $windAngle$ 参数(可由污染模式的输出结果 U, V 向量得到),由于粒子在纵向方向主要受重力和空气浮力的作用,加上表达不确定因素的扰动方差,速度计算公式如下:

$$\begin{cases} velocity.x = windSpeed \times \cos(windAngle) \\ \quad + Rand() \times vDisturb.x \\ velocity.y = ((mg - \rho_{\text{空}} V) \div m) \times t \\ \quad + Rand() \times velocityDisturb.y \\ velocity.z = windSpeed \times \sin(windAngle) \\ \quad + Rand() \times vDisturb.z \end{cases} \quad (4)$$

其中 m 是粒子的重量, g 是重力加速度, $\rho_{\text{空}}$ 是空气的密度, V 是粒子的体积, t 为粒子生存的时间, $vDisturb$ 是粒子在 x, y, z 方向上的速度方差。可根据具体模拟效果做进一步简化, 如不考虑重力和空气浮力的影响。

在完成个体粒子模型定义之后, 整个立体空间就可被定义成一组表达空气污染粒子群。接着从粒子产生、活动、消亡的过程, 建立粒子群的运动状态的描述, 利用粒子的颜色、大小、形状、密度(数量)和空间位置等属性的变化来实现空气污染动态扩散可视化效果的模拟。对于每一个粒子的颜色和透明度, 可根据模型计算结果空气污染浓度进行更新。粒子的大小按照预先规定好的属性进行变换, 如定义一个大小范围, 在生命周期中进行随机变化。而空气污染位置的更新就复杂些, 为了表现其不规则性, 在 x, z 方向上除了加上风力的影响, 还加上了扰动, 在 y 方向上对速度加了扰动。在当前一帧中粒子的位置 $newPos$ 与上一帧的位置 $oldPos$ 的计算关系如下:

$$\begin{cases} newPos.x = oldPos.x + (velocity.x + Rand() \\ \quad \times vDisturb.x) \times dt \\ newPos.y = oldPos.y + (velocity.y + Rand() \\ \quad \times vDisturb.y) \times dt \\ newPos.z = oldPos.z + (velocity.z + Rand() \\ \quad \times vDisturb.z) \times dt \end{cases} \quad (5)$$

其中, dt 为两图像帧之间间隔的时间。

由于空气阻力和风场的作用, 空气污染粒子在运动过程中总是做不规则的转动, 因而在对粒子角度进行更新时转动速度和方向可采用随机, 计算公式如下:

$$\begin{cases} newAngle.x = oldAngle.x + Rand() \\ \quad \times rDisturb.x \\ newAngle.y = oldAngle.y + Rand() \\ \quad \times rDisturb.y \\ newAngle.z = oldAngle.z + Rand() \\ \quad \times rDisturb.z \end{cases} \quad (6)$$

其中 $oldAngle$ 为粒子上一帧转动的角度, $rDisturb$ 是转动的扰动角速度。为了有效表达, 注意 $rDisturb$ 的值不能太大, 并且在 x, y, z 方向上等值。

最后, 根据以上定义的粒子模型, 编写程序实现空气粒子系统的可视化表达。主要分为以下几步: (1) 定义、创建、设置粒子系统, 并将其添加到场景中; (2) 定义、创建、设置单个粒子, 并将其添加到粒子系统中; (3) 创建与粒子系统相关联的粒子系统更新器, 并将其添加到场景中; (4) 创建与粒子系统相关联的粒子发生器, 设置粒子的数据、位置和发射速度等属性; (5) 利用上述空气污染粒子的简化力学特性, 控制粒子在其生存周期的运动。从而根据不同时刻的污染数据, 执行粒子系统中单个粒子的属性更新, 反应空气污染扩散的变化规律。

2 实时效率优化

城市群区域的空气污染涉及的范围广, 理想情况是粒子系统的分布区域是在整个三维空间中, 所涉及的空气污染粒子数目量太大。然而由于计算机能力的局限性, 粒子数量的多少将直接影响三维场景的实时性。同时, 空气污染扩散不能脱离所处的地理环境, 所以可视化模拟时还需要考虑地形和云、雾、雨等大气环境效果的综合表达, 这些都会极大地增加计算机的负担, 降低可视化绘制效率。因此, 从满足基本物理规律和较好视觉效果表达的立足点出发, 需要对场景进行实时优化, 以提高场景绘制效率, 支持漫游和查询等交互操作。通过对粒子动态建模过程中的相关环节进行优化, 在满足视觉效果的前提下尽量减少粒子的数目, 节约系统资源, 从而解决绘制速度和真实性的矛盾, 满足场景效果的逼真性和响应的实时性。

2.1 粒子的产生

可见性裁剪是根据当前场景的视点位置, 对粒子节点进行不可见剔除, 以提高显示效率。对不在视域范围内的粒子进行视域裁剪, 不添加于场景图中; 对在视域内的粒子也判断是否被遮挡, 不可见则进行删除; 计算粒子几何包围球在屏幕上的投影, 如果其屏幕上投影像素误差满足给定的限差, 也进行剔除。通过视域裁剪和遮挡剔除, 能够保证仅在可见域内产生粒子, 可减少不必要的计算资源开销, 从而提高绘制效率。

此外, 在粒子系统中, 活动的粒子不断消亡, 同时新粒子不断产生, 通过这个过程来描述不规则物

体的动态过程,其中新产生的粒子数量控制是关键。可根据视点距离的远近来进行自动调节,以满足效果的情况下提高效率。本文引入粒子的体密度(单位体积内的粒子数量 *density*)与粒子包围盒在屏幕像素投影成正比的关系来计算每个粒子发射器需要产生的粒子数量,根据距离的远近动态控制粒子的数量,在满足视觉效果的前提下进一步减少不必要的粒子数目,提高绘制效率。粒子数量的计算公式是:

$$ParticleNumber = Volume \times density \times k \times L \div (D \times \alpha) \quad (7)$$

其中, *Volume* 为粒子发射区域体积, *k* 为可调节参数, *L* 为粒子发射区域长度, α 为视角, *D* 为视点到粒子发射中心点坐标的距离, *density* 是单位体积内粒子数量,即粒子密度,可由该粒子空气污染浓度得到。

2.2 粒子的消亡

通过对不可见区域裁剪,把对视景效果没有贡献的粒子消除之后,还需要对可见性区域内的粒子进行消亡判断。首先根据可见性判断粒子是否生存,可依据以下几个准则:(1)粒子在当前视景范围内;(2)粒子在屏幕上投影像素误差满足要求;(3)粒子不被不可见物体遮挡。需要完全满足这 3 个条件,否则宣布粒子死亡。其次,对达到生命周期或达到一定条件也认为该粒子消亡,如空气粒子污染浓度小于一定限值时,对空气污染的影响变小,可以忽略,也可认为粒子应该消亡。此外,如粒子不在分布域中或者粒子落在了地上,也认为该粒子对场景不作贡献,应该消亡。对粒子是否落在了地上或场景中是否有其他景物上,如进行准确判断,需要遍历场景中所有模型的片元,并与粒子下落的轨迹求交,使用这样方法对任何复杂的场景,其消耗的时间和计算开销都会很大,难以实时完成。因此将该条件简化为当粒子的垂向坐标值 *Y* 小于其所在位置的地平面垂向坐标时,即认为该粒子消亡。

2.3 粒子的绘制

粒子的形状可以是小球、立方体或其他形状,也可结合广告牌技术,用贴上纹理的小四边形作为基本粒子,以达到较好的效果。为了表现粒子形状是不规则的,可以采用多种纹理,在粒子产生时随机地选取,从而达到满意的视觉效果。对特殊效果的模拟,还可以建立不同细节层次的多级粒子系统。当粒子产生在距离视点较远的位置时使用面粒子,当粒子产生在距离视点较近的位置时采用体粒子,即

采用多个交叉带有纹理的四边形绘制。

3 原型系统及初步试验

根据上述方案,本文利用 Visual Studio 2005.NET、OpenGL 和 OpenSceneGraph 开发了一个模拟空气污染扩散的虚拟地理环境原型系统。实验硬件环境为 HP6910p 笔记本,其处理器为英特尔双核 1.80GHz,内存 2GB,显卡为 ATI Mobility Radeon X2300,操作系统为 Windows XP。实验区域为大珠江三角洲区域,由珠江流域三角洲及其外围平原组成,包括香港、澳门、广州、深圳、珠海、东莞、佛山、中山、惠州、江门、肇庆等 11 个城市,面积 42824km²,基础地理环境数据包括有数字高程模型(DEM)、影像数据、地物数据、专题数据等多种类型数据,还包括不同尺度比例的数据,如 DEM 数据包括 90m、10m、0.5m 等不同尺度的分辨率数据,遥感影像数据包括 30m ETM、2.5m Spot 以及 0.5m 航空正射影像等多种分辨率数据。污染源为分布在珠江三角洲地区的 3180 个点污染源,使用三维多尺度的欧拉型扩散模式在超级计算机上计算出,计算尺度为 3km × 3km,每 10min 一个时刻,每个数据文件包括纬度、经度、行数、列数、层数、绝对高程及 SO₂ 浓度。

基于粒子系统的建模方法,开展了珠江三角洲地区空气污染扩散的时空动态模拟。图 1 显示了珠江三角洲地区的空气污染扩散的几个不同时刻模拟效果。能够清楚地看出污染源所排放的废气在地理环境中的时空变化过程,从而直观地了解废气污染扩散在不同时刻对不同地理空间的影响。专家或政府官员可以选择感兴趣区域进行详细了解。图 2 显示了香港局部地区几种不同效果的对比,分别为虚拟地形效果,第 90min 的空气污染扩散的模拟效果,以及相对应的加雾的场景效果。从模拟的可视化效果上看,具有较好的逼真性。在原型系统中,通过对大珠三角地区的数据模型和数据组织策略进行优化,进行场景预先计算,实现数据的动态装载和渐进描绘,能够实时显示具备原始精度的数据模型,单独地形漫游基本上能够到 60 帧/秒左右。在进行空气污染扩散的模拟过程中,经过对粒子系统进行实时效率优化,绘制速度能够达到 18 ~ 50 帧/秒。从实际运行效果来看,达到了实时性,从而能够实现场景的流畅漫游操作,有效地支持空间位置坐标和空间浓度查询分析等扩展功能。因此,实验效果证明,基于本文的设计方案开发的原型系统,具有绘制效率

的实时性和模拟效果的逼真性,能够有效地支持空

气污染扩散模拟与交互查询。

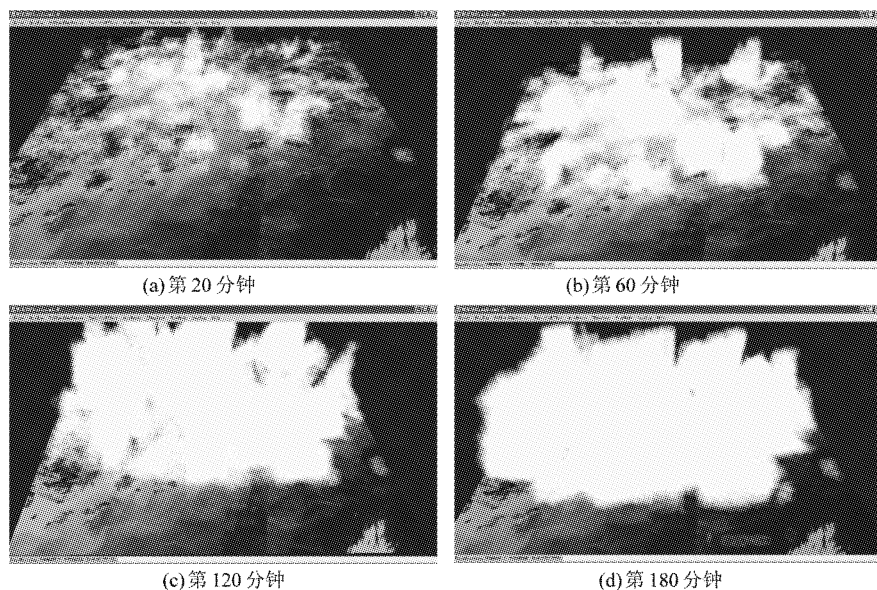


图 1 空气污染扩散模拟

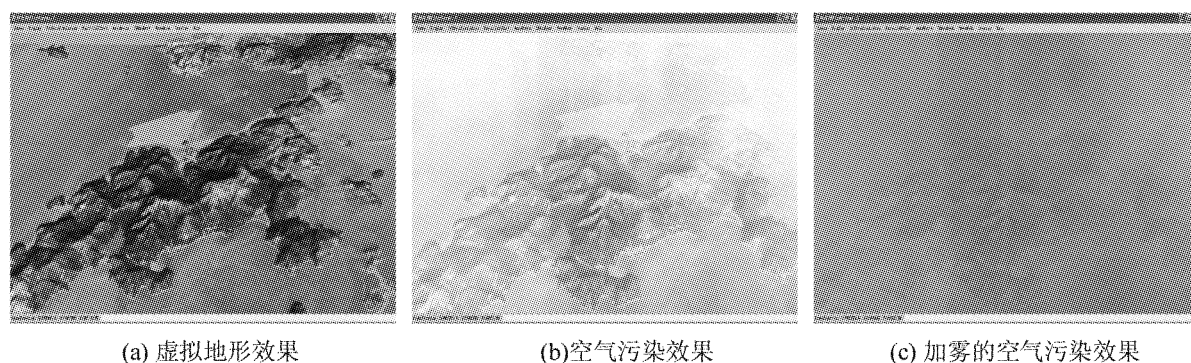


图 2 香港局部地区几种不同效果的对比

4 结 论

基于虚拟地理环境开展城市群空气污染扩散模拟与交互,可有助于直观地了解污染区域的真实情况,对于科学地制定城市环境保护措施具有重要的意义。但空气污染气流扩散的外观极不规则,形态十分复杂,并随时间而变化,常规的点、线、面建模方法难以实现有效的表达。理论和实验证明,基于粒子系统的方法是有效的方法。粒子系统从微观上着手,将动态、模糊的污染物定义为微观粒子的集合,通过采用随机过程理论对污染气流扩散进行约束,从而能够在宏观上达到对空气污染扩散的动态性和随机性的有效描述。本文重点开展了基于粒子系统的动态建模方法的研究,并以珠江三角洲地区为例

开发了原型系统并对其进行初步试验,实现了空气污染模拟的逼真性和效率实时性,取得了良好的效果。下一步工作是将现有成果同网络结合起来,开展用于空气污染治理的分布式虚拟地理环境研究,实现空气污染的多城市区域综合治理。

参考文献

- [1] Pebesma E J, Jong K D, Briggs D. Interactive visualization of uncertain spatial and spatio-temporal data under different scenarios: an air quality example. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(5):515-527
- [2] 林琨, 龚建华, 施晶晶. 从地图到地理信息系统与虚拟地理环境——试论地理学语言的演变. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(4):18-23
- [3] 林琨, 徐丙立. 关于虚拟地理环境研究的几点思考. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(2):1-7

- [4] 龚建华,林琤. 虚拟地理环境——在线虚拟现实的地理学透视. 北京: 高等教育出版社. 2001
- [5] 徐智勇, 吴小芳. 虚拟地理环境中气候环境模拟研究. 测绘信息与工程, 2006, 31(1):38-40
- [6] Reeves W. T, Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Transactions on Graphics*, 1983, 2(2):91-108
- [7] 张芹, 吴慧中, 张健. 基于粒子系统的建模方法研究. 计算机科学, 2003, 30:144-146
- [8] 沈大勇, 马蔼乃, 林琤等. 遥感信息模型、粒子系统与元球结合模拟坡面水蚀过程. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(6):838-845
- [9] 樊琦, 蒙伟光, 王雪梅等. 美国环保局第三代空气质量预报和评估系统. 重庆环境科学, 2003, 25(11):134-137

Study on simulation of air pollution dispersion based on the particle system method

Zhu Jun^{* **}, Lin Hui^{*}, Xu Bingli^{**}

(* Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong)

(** Surveying Engineering Department, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract

This paper mainly describes the simulation study of dynamic air pollution dispersion by construction of a virtual geographic environment (VGE) based on the particle system method. The particle system can effectively simulate uncertain fuzzy air pollution phenomena, which is otherwise very hard to reproduce with conventional rendering techniques. The method of the study improves the scene rendering efficiency starting with the key links of the particle emission area, particle motion and particle rendering when a satisfied effect in visual sense is obtained. A VGE prototype system was developed VGE for simulating the air pollution dispersion in the Pearl River Delta region of China. The simulation results prove that the scheme addressed in the paper is effective and feasible. It can efficiently represent the air pollution and improve the effectiveness in mutual real-time operation.

Key words: virtual geographic environment (VGE), air pollution, particle system, real-time optimization