

文章编号: 1004-4574(2005) 03- 0083- 06

# 用 GIS与虚拟现实技术模拟火灾过程 ——应用和展望

邹亮<sup>1,2</sup>, 史文中<sup>2</sup>, 任爱珠<sup>1</sup>(1 清华大学土木工程系 防灾减灾研究所, 北京 100084 2 香港理工大学 土地测量  
与地理资讯系 地球资讯科技研究中心, 香港九龙红磡)

**摘要:** 信息技术的发展已使得用计算机来模拟灾害过程及进行指挥救援成为可能。通过对国内外文献的分析, 总结了GIS和虚拟现实技术在当前火灾模拟与控制方面的应用以及二者集成应用于火灾科学研究的可行性, 并在此基础上提出了建筑火灾及人员疏散模拟系统的设计框架。该系统可针对现有和新建建筑, 研究火灾发展及其可能对结构造成的影响, 并进行人员疏散模拟与火灾危险性分析。  
**关键词:** 地理信息系统; 虚拟现实; 火灾

中图分类号: TP7 文献标识码: A

## Simulation of fire process using GIS and virtual reality technologies application and development expectation

ZOU Liang<sup>1,2</sup>, SHI Wen-zhong<sup>2</sup>, REN Ai-zhu<sup>1</sup>(1 Institute of Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Dept. Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084  
2 Advanced Research Centre for Spatial Information Technology, Dept. of Land Surveying and Geoinformatics,  
The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

**Abstract** The development of information technology has led both of the computing-based disaster-simulating process and life-saving management have become possible. After reviewing and analyzing this field-related and relevant research articles, this paper is to summarise the applications of GIS and virtual reality technologies in the perspective of fire disaster's simulation and control, as well as the possibility of their applicable integration on the fire disaster-related scientific research, and meanwhile, based on these previous research bases, to propose a newly designed plan for a system of a fire in a building and evacuation of people. This proposed new system implemented in both existing buildings and new constructions assists not only on the research of fire-disaster development and the possible influences of the corresponding structures but also the analyses of evacuating victims and the risk of a fire.  
**Key words** GIS; virtual reality; fire

火灾是各种灾害中发生最频繁且极具毁灭性的灾害之一, 其直接损失仅次于干旱和洪涝, 而发生的频度则居各灾种之首。火灾对国民经济和生态环境的危害是严重的, 其造成的损失大大超过直接经济损失。目前人类对火灾、地震这类突发性灾害的发生还无法完全控制, 也无法对多种自然灾害的发生与成灾规模进行准确的预测与预报, 但灾害的损失程度却取决于人们对其预防、救灾和重建的能力。无数事实证明, 伴随着

收稿日期: 2005- 05- 07 修订日期: 2005- 05- 29

基金项目: Integration of GIS, CAD and Virtual Reality for Construction (PolyU 4/34/37/Z062)

作者简介: 邹亮 (1981- ), 男, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要从事 GIS与虚拟现实在防灾减灾中的应用研究。

当代自然科学的高度发展,人类可以利用各种最新的科学理论与掌握的工程科学方法来有效地防御或减轻自然灾害所造成的人员伤亡与经济损失。对于火灾、地震这样的大尺度、多维空间问题,试验研究比较困难,费用也很高,而计算机模拟则具有安全、高效、成本低廉的特点,因此将会发展为灾害和结构安全研究的重要手段,对人类提高抗御自然灾害的能力起到非常重要的推动作用。本文通过对国内外文献的阅读与分析,总结了当前在各个领域应用研究比较多的地理信息系统(GIS)和虚拟现实(virtual reality, VR)技术在火灾模拟过程中的应用,并对二者在火灾模拟与控制中的集成应用作出了展望。

# 1 地理信息系统及其在火灾领域的应用

地理信息系统(GIS)是20世纪60年代开始迅速发展起来的地理学研究技术,是多种学科交叉的产物。地理信息系统是以地理空间数据库为基础,采用地理模型分析方法,适时提供多种空间的和动态的地理信息,为地理研究和地理决策服务的计算机技术系统。

将GIS应用到火灾科学领域,国内外已有大量的研究,有很多是关于GIS技术在森林火灾(植被火灾)或野外火灾的应用。Wybo<sup>[1]</sup>等提出了一些评估方法的结合,集成在一个决策支持系统中,使用4种方法,关系到火灾发生的因素,从历史数据评估火灾频率,可燃物的易燃性,起火和火势猛烈后的扑救,使用了一种与一个关系型数据库和一个GIS联系的基于知识的方法来集成这些方法;Jain<sup>[2]</sup>等使用了一个集成了遥感和地理信息系统的方法,按森林火灾风险给印度一个生态系统比较脆弱的国家公园的各区域分级;也有一些GIS技术在城市火灾方面应用,Bryant<sup>[3]</sup>曾在文章中介绍了FIRE-SPREAD,一个损失评估计算机模拟模型,它能估计城市火灾的蔓延。该模型与一个地理信息系统结合以产生彩色图形输出,描绘模拟某一时间段内的火灾蔓延,有了这些信息,管理者能够预见哪些区域、设施和资源有危险并采取相应措施。

将GIS引入火灾过程模拟,所有跟地理信息密切相关的模型信息都在计算机内部得到处理和完成。从传统GIS的数据观点看,其提供了地理特征、查询表等数据形式,但火灾过程模拟模型用这些数据形式不能充分表达,需要用更广泛的GIS观点来进行建模。这种模型必须支持GIS地图元素的复合结构,火灾过程模拟模型也必须包含在地理信息的空间现象表述之中。因此,这种模型需建立在GIS的整个框架之中,和空间对象相联系组成比较高层的单元,这样比简单的地图加上模型的方式更加接近地理信息集成的观点<sup>[4]</sup>。对应不同的火灾模拟模型,应分别建立GIS模型对象,对象除了包含模型运行基本的地理信息和属性数据外,还有由火灾过程模拟算法实现和控制的函数和状态变量。郑凯等开发了一个基于GIS的火灾模拟系统GIS-FP,将地理信息和火灾过程模拟动画结合在一起,该系统可以进行三维的单个油罐、多个油罐的燃烧过程模拟和罐区油品泄漏的二维模拟。用户除了可以由该系统得到常规GIS所能提供的管理和分析结果外,还可以得到与点特征相关的物理量(如速度矢量)、当前燃烧状况、火焰特征、烟气状况、用户指定区域的燃烧速率和状况,火灾影响地理网格信息、风场矢量数据等(如图1所示)。

目前我国不少城市已经开始使用基于GIS的消防指挥系统,对消防部门提高信息处理效率、争取灭火时间起到重要作用。但是现有的基于GIS的消防指挥系统大多只能显示二维平面信息,不能与三维场景进行交互。

随着GIS在各个领域的广泛深入应用,人们已经不再满足GIS简单的二维图表表示,希望GIS的分析显示结果有更为生动直观的表现。而虚拟现实系统作为一种计算机系统,人机关系和谐,可以使人产生身临其境的感觉,有助于对研究对象进行定性和定量相结合的研究。因此GIS与VR相结合,利用VR生动直观、沉

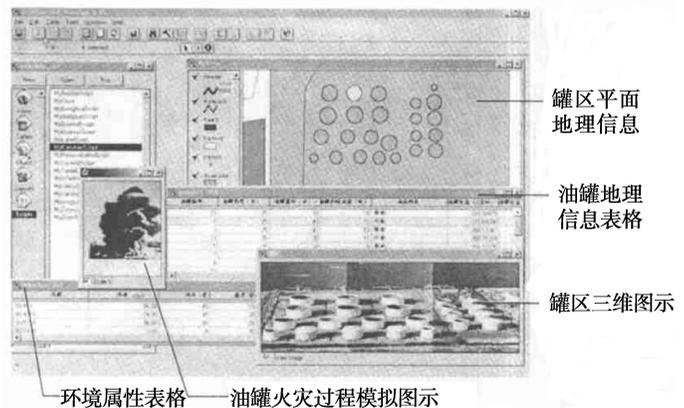


图 1 GIS-FP 系统界面

Fig 1 Interface of GIS-FP system

浸交互的特点,达到更好的理解研究目标的目的,是趋势使然。

## 2 虚拟现实及其在火灾领域的应用

虚拟现实技术是在计算机图形学、计算机仿真技术、人-机接口技术、多媒体技术以及传感技术的基础上发展起来的一门交叉学科,可以应用在火灾的科学计算可视化、火灾安全工程设计、消防安全教育培训等方面。引入虚拟现实技术开发的可视化工具能给用户更多的观察自由度,用户可在数值结果“搭建”的模型中穿梭,真切地感受到每个细节,为用户观察结果、检验计算模型的正确性提供便利。在火灾安全工程设计方面,设计人员和消防安全管理人员可以不再局限于图纸的观察设计结果,可在工程方案实施之前就近乎真实地感知到设计结果,从而验证和完善设计。在消防指挥和安全教育方面,可以利用虚拟现实技术模拟真实火灾环境,将火灾发生、发展和蔓延的场景逼真地表现出来,进行消防路线的设计,用户可以通过“实际参与”的形式体会火灾的发展过程,提高消防安全认识和技能。

将虚拟现实应用到火灾控制中的研究目前在国内外尚属初步阶段。美国再保险公司与一些政府部门合作开发了一个训练火灾调查员的虚拟现实应用程序,该程序模拟了火灾现场的混乱和嘈杂场面,在调查员考虑该做什么时,时间在流逝,证据在消失,目击者逐渐远去,符合实际火灾现场的情况。该程序教调查员学会搜集证据,判断火灾起因,询问目击者,甚至准备起诉用的案卷。该程序还附有一个巨大的火灾调查数据库<sup>[5]</sup>。伯克利的 Walkthru 程序与国家标准和技术局的 CFAST 火灾模拟器集成的系统创建了对建筑物火灾安全系统设计环境的模拟,也允许火灾安全工程师评价建筑物设计的性能,并使基于性能的火灾规范成为可能。文中介绍了在 Walkthru 程序中使用的空间解耦和可视化预处理方法允许模拟器与可视化程序之间的数据传输进行优化。这一优化改进了利用现有通讯带宽以最佳顺序获取模拟数据的能力。文中提出了适当的通讯模型和数据结构,讨论了环境模拟与虚拟世界集成的一般问题,以及集成系统的特点,包括用户界面和模拟编程界面的相关方面。对未来的结构模拟器提出了建议:它们能有选择地使它们的计算能力用于给定的空间、时间域,并更有效地支持实时交互的虚拟环境可视化<sup>[6]</sup>。Shih<sup>[7]</sup>等比较了火灾中人员疏散的传统假设与利用虚拟现实测试结果的不同。通过虚拟现实研究得出,火灾中被疏散的人员按传统假设的最短路线疏散的并不占多数。通过一个与四个场景相关的过程进行模拟测试,得到的结果反映了建筑防火分区与出口设置在建筑规划设计中的重要性。

火灾虚拟现实系统与其他虚拟现实系统最大的区别是其对火灾过程的模拟和再现,即对火灾发生、发展和蔓延过程进行实时分析与模拟,系统所实现的主要功能都与火灾过程有着密切联系。构建这样的系统最大的难点在于要选择一个合适的火灾模型,该模型既要满足计算机实时计算的能力,又要有较好的实际显示效果。

与火灾研究有关的流体力学方程、热传导方程和燃烧理论由来已久,但其计算机模拟研究方兴未艾。这是因为火灾现场火势的发展有很大的偶然性,对于火灾机理的研究如空气动力学、紊流搅拌、辐射传导、共轭热传导等尚在完善之中。当前的研究大多是在进行了大量简化和假设的前提下进行的。目前火灾模拟的方法主要有3种:经验模拟、半物理模拟和物理模拟。经验模拟即专家系统,是现有经验公式与现代计算机技术结合,如美国的 FireForm、英国的 AskRSF、澳大利亚的 FireCAIC 等。半物理模拟又称区域模拟,基本思想是把研究空间划分为内部参数均匀的若干控制区域,对每个区域应用质量、能量守恒定律得到火灾动力学演化的基本方程。物理模拟即场模拟,是基于控制火灾过程的质量、动量、能量和化学反应多方面基本方程的一种高层次复杂模拟。美国国家技术标准局(NIST)的建筑火灾实验室(BFRL)研究开发的场模拟软件 FDS(fire dynamic simulator)采用大涡模拟技术、开放程序体系结构,具有良好的后处理能力,计算结果得到较多实验验证<sup>[8]</sup>。

清华大学的史建勇等<sup>[9]</sup>以有限元分析软件 ANSYS和火灾模拟软件 FDS为基础,针对2008年北京奥运会体育场火灾安全分析开发了一套建筑火灾模拟和结构安全综合分析系统。该系统以 AutoCAD 为建模平台,建立了模型转化模块、数据重构模块、控制模块以及交互式用户界面,可以进行火灾场景的仿真和结构在火灾下的非线性分析,实现建筑火灾结构安全的一体化分析。

### 3 GIS与虚拟现实在火灾领域的集成应用

总的来说, GIS和虚拟现实在火灾控制中都已经有了一些较成功的应用, 但二者集成应用的尝试还很少。

20世纪 90年代初期, Faust和 Koller比较成功地进行了地理信息系统和虚拟现实系统的集成试验, 并提出了虚拟现实地理信息系统(VR-GIS)。VR-GIS是把原先在二维地理信息系统中只占一般地位的三维可视化模块提高到了整个系统的核心地位, 把用户对地学数据的三维视觉、听觉等多种感觉与数据实时交互作为系统存在的基础。与传统的地理信息系统相比, VR-GIS具有多学科集成性、空间特征、动态特征、基础开放性与实用性。VR-GIS把GIS具有的空间分析与查询功能增加到了虚拟环境中, 同时也为GIS用户提供了可视化用户界面。VR-GIS能以其独特的处理空间数据的技术手段提高人类处理和分析大量有关地球资源、环境、社会与经济数据的能力, 并拓展信息处理和应用的领域<sup>[10]</sup>。

要使GIS和VR能够互操作, 必须首先解决二者之间的数据互操作, 通过开发用户程序接口, 实现异构系统之间的数据互操作。在进行空间数据互操作之前, 首先应考虑的问题有: (1)数据格式自身对空间信息存储数学基础的要求; (2)数据的物理存储格式的要求; (3)数据转换的可逆性分析。在不同系统之间实现数据交换, 目前有3种方法: (1)外部数据交换, 即通常定义一种外部数据交换格式与其他软件的数据转换采用输入/输出方式; (2)数据互操作, 即制定出一个各方都能接受的空间数据格式标准, 遵循这一标准, 不同软件就可以共享对方数据, 此方法比外部转换要方便; (3)地理信息互操作, 与此对应的是OpenGIS, 即开放式地理信息系统, 是为了在异构分布数据库中实现信息共享而采取的方法, 这是一种最好的空间数据共享方式, 但目前实现起来较困难<sup>[11]</sup>。

为实现GIS和虚拟现实技术的结合, 探讨它们集成的方法和技术, 杨必胜等人以三维数据模型和算法为理论基础, 结合三维可视化技术、计算机图形学开发了一个基于桌面的交互式3D GIS(Space/Info)。该系统是基于VC++6.0和OpenGL开发的软件系统。系统集三维模型创建、编辑、三维浏览、分析、查询为一体, 可以接受摄影测量数据, 3DMax、AutoCAD等软件建立、通过第三方插件转换的三维模型, 在界面显示上可以同时显示二维和三维模型, 为虚拟漫游的导航定位提供了便捷的途径。在实时显示方面, 该系统的一个主要手段是实现了LOD模型的快速构造算法, 为大数据量三维模型的快速漫游打下一定基础, 从而使该系统对大范围内三维数字城市模型的创建、管理、漫游成为可能。该系统在显示方式方面可以提供360度绕一点鸟瞰显示、模拟飞行、汽车行驶或徒步参观显示, 并提供浏览路线编辑<sup>[12]</sup>。

韩智等<sup>[13]</sup>在水厂的专业GIS中采用了VR技术进行显示, 用户可以直接看到地下管网的立体组织结构, 并可以交互进行旋转、放大、缩小等操作进行观察, 可以直接在立体管网中进行通常的查询操作。

地下管网的对象主要包括点状对象和线状对象, 该文作者自行开发了用于提取数据以及显示查询的应用模块, 使用了OpenGL开发的观察工具。OpenGL最初是SGI公司为其图形工作站开发的可以独立于窗口操作系统和硬件环境的图形开发环境, 目的是将用户从具体的硬件系统和操作系统中解放出来, 可以完全独立于指令系统在其支持的硬件平台上运行, 其运行机制为客户/服务器方式。OpenGL浏览器是以ActiveX控件形式组织到用户GIS系统中, 可以自由和系统数据交互, 但在数据组织和功能上存在如下不足: 只能显示线状图形, 不能显示点状图形, 不能显示管段截面。该文作者又尝试了使用VRML进行管段的显示, 但VRML本身不支持直接的交互, 因此需要使用外部编程接口(extra authorizing interface)来处理点击等操作。在用户点击时, 先将消息由VRML节点发送至VRML浏览器, 再经过Web浏览器



图 2 漫游起点场景

Fig 2 Scene at starting point of roaming around

发送至外部的 JAVA 程序,由 JAVA 使用其数据库引擎进行数据库的查询等操作。

清华大学许云等<sup>[4]</sup>对虚拟现实技术在基于 GIS的城市消防指挥系统中的应用进行了研究,以 ArcView 为 GIS平台,使用 WTK 实现虚拟现实功能,主要面向对象是较大范围的建筑群(见图 2)。该系统着重解决的是基于电子地图的海量建筑物三维建模问题、多源数据融合和可视化问题以及虚拟场景的表现与控制问题。该系统作为消防指挥之用,能提供消防路线的查询与漫游,但不能模拟火灾发生的实际场景。

### 4 展望

随着 GIS和虚拟现实技术的不断发展,二者结合的趋势也越来越明显。将 GIS和虚拟现实技术引入火灾领域进行火灾机理研究以及消防工程应用研究是很有意义的。本文作者设计了将 GIS与虚拟现实集成应用于火灾模拟与控制过程的系统框架。图 3是该系统框架的示意图。该系统将 GIS应用到大型公共建筑的人员疏散模拟,与虚拟现实技术结合实现室内外场景的可视化、查询与分析。虚拟现实技术可以帮助实现火灾数值计算结果的可视化,可以更好地认识火灾的发生发展过程;GIS的引入可以发挥其空间分析与数据管理的功能,如距离的量测、buffer overlay 数据统计等,火灾模拟模型同时包含模型运行的实现与控制操作函数、状态变量、基本地理信息和属性数据,模拟算法运行的结果作为对象的状态变量存储,实现火灾模型的空间现象表述。同时,以专家知识库为基础的人工智能模块对模型执行的中间数据结果进行实时可靠性检测,使计算结果最大限度地符合实际情况。

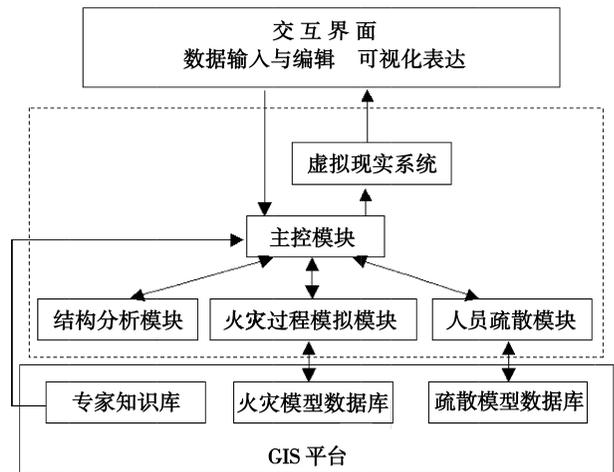


图 3 VR-GIS建筑火灾模拟系统示意图

Fig 3 Sketch of the VR-GIS building fire simulating system

目前 GIS的应用基本上都是较大范围的,如整个国家、地区、城市以及居民小区范围的,建筑物一般都是作为一个整体来表现,火灾的模拟不仅要表现建筑物整体的火势状况,还应能表现建筑物内部的火势发展情况及建筑物的结构破坏情况,此外,还应能进行建筑物内的人员疏散模拟。GIS的几何结构对人员疏散的模拟是比较方便的。GIS中的网络结构适于在人员疏散的模拟中进行疏散路线的选择,而用 CAD系统就较难实现。生物在生存空间中会本能地与其他物体尽量保持一定距离;在运动中为了保持一定的速度,相互间的距离也不能太小。在疏散过程中,聚集在疏散通道和出入口的人群发生拥挤时,人与人之间距离过小,就会相互排斥而影响疏散速度;当人群过分拥挤时,就有可能发生挤踏而造成死伤。在进行疏散模拟时,考察个体的疏散情况,可将个体表示成 GIS中的点单元,利用 GIS的缓冲区功能即可表现这种特征。疏散模型的建立是人员疏散模拟中最关键的任务。疏散模拟需考虑火灾的发展情况、环境变化及人的心理变化等多种因素,具体的建模方法将另文叙述。

### 5 结语

火灾是对建筑物结构安全威胁非常大的灾害事故,建筑火灾及人员疏散行为研究是一个涉及多学科的复杂的系统课题。本文总结了当前 GIS和虚拟现实技术在火灾模拟与控制中的应用,并将 GIS与虚拟现实技术结合,设计了建筑火灾及人员疏散模拟系统的框架。该系统可针对现有和新建建筑,研究火灾发展及其可能对结构造成的影响,在此基础上进行人员疏散模拟及火灾危险性分析,以此为依据对建筑物进行合理的防火安全设计。这对于预防和采取有效措施控制火灾发生、保证火灾时人员有效疏散具有重要作用和意义。

## 参考文献:

- [1] Wybo J L, Guamieri F, Richard B. Forest- fire danger assessment methods and decision- support[ J]. Safety Science, 1995, 20( 1): 61- 70.
- [2] Jain A, Ravan SA, Singh RK, Das KK, Roy PS. Forest fire risk modeling using remote sensing and geographic information system[ J]. Current science 70 ( 10): 928- 933
- [3] Bryant P, Doenges GR, Samuel WB, Martin SB, Willoughby AB. Fire spread computer simulation of urban conflagrations[ A]. Proceedings of the 1993 Simulation Multiconference on the International Emergency Management and Engineering Conference[ C]. San Diego, CA, USA. SCS 1993. pp. 149- 54
- [4] 郑凯, 赵保华. GIS模型在火灾过程模拟中的应用[ J]. 火灾科学, 2002, 11( 3): 170- 175.
- [5] Dan L. American reuses virtual reality to fight arson[ J]. InterFIRE VR, 1999, 103( 28): S23
- [6] Bukowski R, Sequin C. Interactive simulation of fire in virtual building environments[ A]. Computer Graphics Proceedings[ C]. New York, NY, USA. SIGGRAPH 97. ACM. 1997. pp 35- 44.
- [7] Shih NaarJung, Lin Ching-Yuan, Yang Chih-Hsiang. A virtual reality based feasibility study of evacuation time compared to the traditional calculation method[ J]. Fire Safety Journal, 2000 34: 377- 391
- [8] 丛北华, 廖光煌, 韦亚星. 计算机模拟在火灾科学与工程研究中的应用[ J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23( 2): 63- 69.
- [9] 史健勇, 任爱珠. 火灾下奥运场馆防火性能的计算机模拟与分析[ A]. 第一届抗震减灾学术会议论文集[ C]. 昆明: 云南大学出版社, 2004
- [10] 张晶, 鄂伦. 虚拟现实地理信息系统的设计研究[ J]. 地理学与国土研究, 2002, 18( 2): 63- 69
- [11] 刘晓艳, 张宏, 阎国年, 沈婕. 地理信息系统与虚拟现实之间的数据互操作研究[ J]. 测绘通报, 2003 ( 2): 17- 20.
- [12] 李清泉, 杨必胜, 史文中, 李必军, 胡庆武. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[ M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [13] 韩智, 李九龄. 虚拟现实( VR)技术在供水行业地理信息系统( GIS)中的应用[ J]. 计算机工程与应用, 2001 ( 16): 168- 170.
- [14] 许云, 任爱珠, 潘国帅. 基于 GIS和 VR的消防指挥系统研究[ J]. 土木工程学报, 2003, 36( 5): 92- 96