

火场人员疏散的虚拟现实模拟研究

唐方勤 任爱珠 徐峰 许镇

(清华大学土木工程系,北京 100084)

【摘要】虚拟现实技术的发展使得观察者能够借助计算机模拟增强对危险场景的理解与认识。本文针对火灾场景下的人员疏散,结合虚拟现实与数值模拟开发了原型系统 AutoEscape。系统采用 FDS 对火场的发生发展进行模拟,基于 GIS 技术设计并实现了疏散计算引擎。在此基础上,构建了虚拟现实表现模块,结合数值模拟结果对场景各要素的分布状况及行为特征进行综合描述。应用实例表明,系统有助于观察者对火场人员疏散形成深入全面的认识,从而为应急疏散演习、消防救援指挥等提供虚拟训练环境。

【关键词】疏散模拟;虚拟现实;消防安全;地理信息系统;可视化

【中图分类号】TP3;TU972⁺4 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1674-7461(2009)02-0032-05

1 前言

火灾一旦发生,其对可燃物的敏感性及其扩展蔓延的快速性都是非常惊人的,因此破坏性巨大,容易造成严重的人员伤亡。为减少火灾可能引起的人员伤亡,应当在设计阶段充分考虑建筑布局对应的人员疏散方案,避免因布局不合理、疏散设施不完备对疏散流程形成阻碍。传统的设计手段依靠二维图纸对设计成果加以表现,难以对疏散方案的效率进行评估。而采用实验手段,则很难对真实情况加以模拟,且存在成本较高、危险、难以重复等缺陷。因此,基于虚拟现实技术的计算机模拟方法成为了火场人员疏散问题的一种重要研究方法。借助虚拟现实技术,构造具有沉浸感、交互性、想象力的三维模拟环境,可使研究者对火灾疏散场景形成全面深入的理解认识,具有成本较低、安全可重复、数据易于采集等优势。

研究者们结合疏散计算理论与虚拟现实技术,提出了多种模拟模型对火场人员疏散问题加以研究。比较具有代表性的应用实例包括:地铁车站火灾疏散模拟^[1]、森林火灾救援模拟^[2]、基于计算机游戏的虚拟火灾演练^[3]以及基于虚拟现实的疏散

时间评估研究^[4]等。如何与数值计算结果相结合,运用虚拟现实技术综合表现场景内各要素分布及行为特征,是火场人员疏散模拟的难点之一,尚需进一步研究加以完善。

本文研究了将虚拟现实技术应用于火场人员疏散模拟的方法,对各场景要素进行了综合描述与表现,开发了基于数值模拟与虚拟现实的火场疏散模拟原型系统 AutoEscape。系统采用 FDS(Fire Dynamics Simulator)作为火场数值模拟工具,基于 GIS(Geographic Information System)技术,设计并实现了疏散模拟计算引擎。通过虚拟现实表现模块与模型计算模块之间的交互,针对各要素实现了与数值模拟相结合的可视化过程,创建了具有沉浸感、交互性、想象力的虚拟现实模拟环境。应用实例表明,系统可为应急疏散演习、消防救援指挥等提供虚拟训练环境,为建筑场所的合理布局、保障疏散安全产生积极作用与影响。

2 AutoEscape 系统框架及开发工具

AutoEscape 的系统框架如图 1 所示。系统由用户界面、疏散计算引擎、火场模拟模块、数据可视化模块及底层数据库组成。底层数据库主要包括人

【作者简介】唐方勤,男,工学博士。清华大学土木工程系防灾减灾研究所博士后。主要从事信息技术在结构工程及防灾减灾领域的应用研究,包括计算机辅助工程与设计,地理空间信息分析,火场数值模拟及应急行为建模、图形学可视化方法与虚拟现实等。

员数据库、GIS 数据库、火场时空数据库等。火场模拟模块通过调用 GIS 数据库,生成对应的火场模型,并将火场模拟数据存储在时空数据库。疏散计算引擎由场景分析、毒性评估及行为模拟等子模块构成。场景分析模块调用 GIS 数据库提取环境信息,毒性评估模块则调用火场时空数据库实现对场景内各点烟气毒性的实时评估。行为模拟模块通过与场景分析模块和毒性评估模块的交互,实现对人员疏散行为的模拟。最终疏散计算引擎将建筑信息、火场信息及人员信息输出至数据可视化模块。数据可视化模块针对不同种类数据,调用相应程序将结果数据加以组织后交由虚拟现实图形引擎输出至用户界面。

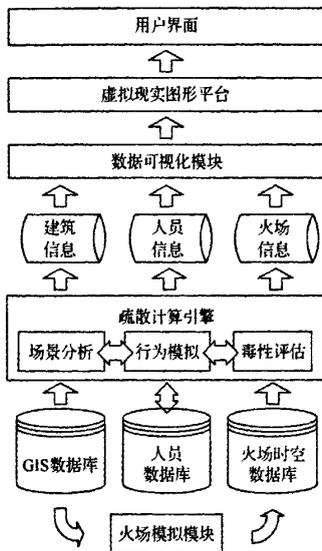


图1 AutoEscape 系统框架

AutoEscape 系统以 Windows XP 操作系统为运行环境,选取 Vega 作为虚拟现实图形平台,采用 GIS 技术为疏散计算的场景分析提供支持,应用场模拟软件 FDS 作为火灾数值模拟工具。采用 Multi-gen Creator 软件对建筑环境进行建模,通过 DI-GUY SDK 开发对人员行为加以模拟。底层数据库采用 GIS 数据库与 Microsoft Access 数据库。整个系统基于 Microsoft .NET 编程完成构建。Multi-gen Creator 软件为实时模拟提供了三维建模环境,其建模成果可直接保存为 OpenFlight 模型格式,在 Vega 平台上自动加载。DI-GUY 是虚拟人物开发库,可实现在 Vega 虚拟场景内添加人物角色,并指定其行为动作加以模拟表现。

3 疏散模拟计算

火灾下的人员疏散是一种非常复杂的多要素相互影响、共同作用的场景,它包括建筑布局的环境特征、火灾及其燃烧产物的分布状况、人员的行为反应等多种要素。因此,在疏散模拟计算时也需要对这些要素特征分别加以分析。据此,本研究设计了场景分析、毒性评估与行为模拟等子模块构成疏散计算引擎。通过各模块间的交互协作,实现对人员疏散行为的预测与模拟。

场景分析子模块借助 GIS 空间分析功能,选择网状模型作为建筑场景的计算几何模型。网状模型采用自定义结点对几何空间进行填充,各结点可具有自身的位置、大小等属性,结点间通过有长度弧段加以连接。网状模型的结构形式与图结构相对应,具有描述灵活、可扩展性强等优点。本研究在对疏散场景进行分析时,以一定的空间距离(如 400 mm)为直径,生成圆形结点实现对场景的离散化。在此基础上,应用搜索算法,为场景内的人员个体生成初步的疏散路径:

$$\Phi = f(G(V, E), V_0) \quad (1)$$

其中, f 为采用的图结构搜索算法,如 A^* 算法^[5]、Dijkstra 算法^[6]等, $G(V, E)$ 是场景分析生成的图结构, V_0 为该人员的初始位置, Φ 是计算所得路径的各结点的集合。

初步疏散路径仅与场景的几何布置、人员的初始位置有关,反映了人员在场景内的基本疏散策略。而在模拟过程中人员实际采取的疏散路径还要受到火场及燃烧产物、场景中其余人员的影响。

对人体在一定时间段内持续暴露于一定含量的燃烧产物中而造成的危害程度进行准确有效的评估,是火灾科学研究的技术难点之一。毒性评估子模块结合火场燃烧产物危害评估的相关研究成果,设计相应的评估函数对火场内各点烟气毒性进行实时评估。一般说来,评估函数 F 具有下述形式:

$$F = f(pos, t, \Delta t, X_{O_2}, X_{CO}, X_{CO_2}, \dots) \quad (2)$$

其中, f 为燃烧产物毒性评估的量化函数,参量 pos 和 t 设定了危害评估对应的时空属性, X 则对应于各关键燃烧产物的有效计算剂量。通过 FDS 模拟,可求得场景内各点 O_2 、 CO 、 CO_2 等气体浓度。本研究选用 N-Gas 模型,通过有效剂量分数 (FED,

Fractional Effective exposure Dose) 对燃烧产物毒性加以评估^[7, 8]。

行为模拟子模块负责对每时间步人员的行为反应进行预测。对于火灾场景,人员具有基本疏散策略与扩展疏散策略。扩展疏散策略是人员模型规则库的必要补充,是特殊情形下对基本疏散策略的调整,从而模拟火灾等紧急情况下人员对外部环境的自适应性及应变能力。人员疏散行为模型通过对现有疏散路径进行评估,决定是否对当前策略进行调整。评估包括三方面因素:

(1) 当前疏散效率高低:

$$\alpha = \frac{\text{flow_rate}}{\text{speed}} \quad (3)$$

其中, flow_rate 是人员个体所在人群的整体移动速度, speed 是人员自由状态下的速度。

(2) 路径受烟气的影响程度:

$$\beta = \text{Visibility}(S) \quad (4)$$

其中, S 是人员的有效观察范围。可按人员当前位置为中心以一定距离(如 10 m)生成缓冲区,取该区域的平均能见度衡量。

(3) 前方路径长度:

$$\gamma = \text{LEN}(V_0, V_{\text{exit}}) \quad (5)$$

即以人员当前位置到目标出口沿疏散路径的距离衡量。

4 虚拟现实表现方法

如前所述,火灾场景下的人员疏散包括建筑环境、火场及燃烧产物、人员等多种要素。为全面描述火灾疏散场景,需要在虚拟现实环境中对各要素进行可视化表现。在此基础上,通过双通道投影,并设置恰当的视差参数,模拟人双眼所获得的视觉图像。观察者借助偏振眼镜等设备可获得立体视觉,在虚拟场景内漫游时达到沉浸效果,从而对火灾疏散场景形成深入认识,增强消防安全意识与技能。

4.1 建筑环境

与烟气、人员两种要素相比,建筑环境在疏散模拟中相对稳定,不具有动态行为特征,因此可将建筑模型设置为静态模型。本研究在 Multigen Creator 环境中对三维建筑模型进行创建,并通过粘贴纹理获得生动逼真的效果,如图 2 所示。在完成图形建模后,通过设置坐标位置、光照条件等参量,将

模型调整到虚拟环境所需的渲染状态,最终在用户界面输出相应的表现效果。

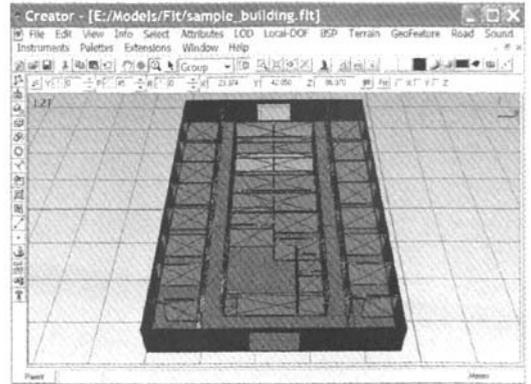


图 2 Multigen Creator 三维建模

4.2 火及烟气的发展蔓延

火与烟气具有流动性很强、形状不规则不稳定的特点,在计算机模拟中通常采用粒子系统技术加以表现。粒子系统是一系列粒子的集合,通过指定发射源及粒子的行为轨迹,以微观角度表现复杂多变、不规律的自然现象^[9],其优点是可获得较真实的效果,缺点则在于难以与数值模型相结合,无法从宏观角度进行控制。而疏散模型所涉及的 FDS 模拟结果,都是从宏观角度描述的物理参量,例如烟层高度等,因此采用粒子系统技术对火及烟气进行表现是不现实的。本研究最终通过构造 OpenFlight 模型实体,结合 FDS 时空数据库存储的火场模拟数据,基于 OpenFlight API 编程实现了火与烟气的动态演示。

4.3 人员行为

疏散场景中的人员是具有动态特征的形体,不仅空间位置可能发生变化,而且所实施的行为动作也将改变其形体姿态,例如奔跑时人体手臂的摆动等。这些动态特征都是三维动态演示需要表达的要素。单纯依靠改变场景中实体位置或朝向的方法,无法对人员动作的细节特征进行表现。本研究基于 DI-GUY SDK 开发,将人物角色动态添加至虚拟场景,根据疏散引擎的数值计算结果,指定角色的相关动作,从而实现疏散过程中人员行为的模拟。借助 DI-GUY 与 Vega 良好的兼容性,可实现建筑环境、火及燃烧烟气、人员等要素在同一虚拟环境下的共存显示。

5 模拟实例

将 AutoEscape 系统应用于某办公建筑进行火灾场景下的人员疏散模拟。该建筑为典型的框架结构,房间形状较规则,两端各设有疏散出口。火源位于某房间角落处(见图3),火灾荷载为 300 kw,火源表面温度为 500℃。虚拟场景内共生成人员 34 人,初始位置随机指定。通过 FDS 模拟火场发生发展情况,AutoEscape 系统计算人员疏散的行为反应,并完成具有沉浸感的虚拟现实模拟。最终在轮廓视图内绘制人员的疏散轨迹如图 3。由图可见,由于 B 出口距离火源位置较远,受火场影响较小,因此成为了主要的疏散出口。

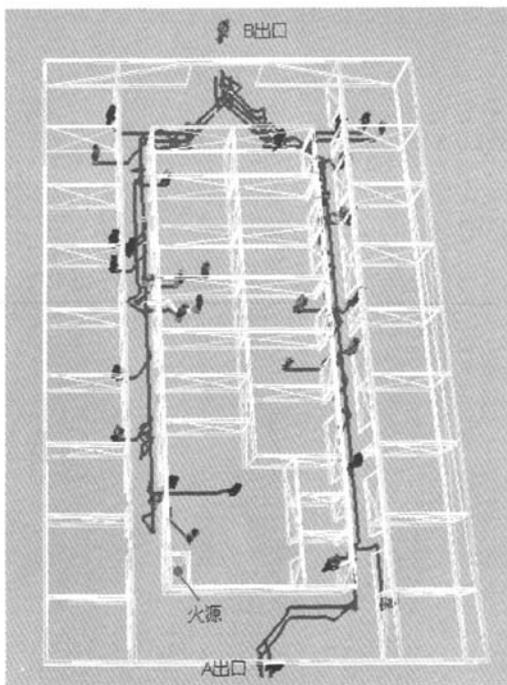


图3 人员疏散轨迹及火源位置示意

模拟过程中,疏散计算引擎对场景内各点燃烧产物毒性进行评估,并施加于受影响的人员个体。受烟气毒性影响,场景中的人员行动力减弱,而在火场的滞留又可能带来进一步的身体伤害。可观察到人员受困于火场的现象如图4所示。图5显示了着火房间内人员的疏散情况。在发现火情后,人员迅速逃离着火房间,继而向建筑的主出口进行疏散。

图6是火场人员疏散过程的全局视图观察示

意。AutoEscape 提供了具有沉浸感、交互性、想象力的虚拟现实模拟环境,从而有助于观察者对火场人员疏散形成深入全面的认识。



图4 受困现象

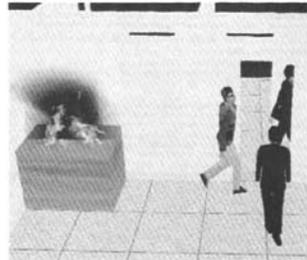


图5 着火房间内的疏散情况

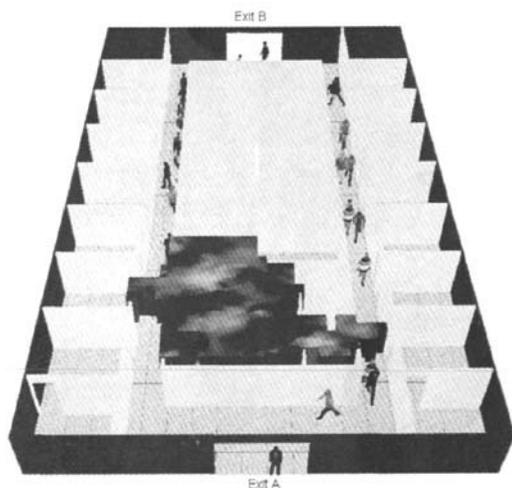


图6 疏散场景的全局视图观察

6 结论

本文针对火灾场景下的人员疏散,基于虚拟现实与数值模拟,开发了火场人员疏散模拟的原型系统 AutoEscape。系统通过 FDS 对火场进行模拟,采用 GIS 技术设计并实现了疏散计算引擎,并对研究场景内各要素进行了综合全面的表现,实现了具有沉浸感、交互性与想象力的虚拟现实模拟环境。在现有研究的基础上,可进一步细化人员疏散行为模型,例如引入反映人员心理状态的参数,从而深入描述在意外事件下人员的行为反应。另外可对虚拟现实表现方案进行优化,例如提高燃烧产物的渲染效率,增强其表现效果等。

参考文献

- [1] Ren A, Chen C, Luo Y. Simulation of emergency evacua-

- tion in virtual reality. *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(5): 674-680.
- [2] Li W, Jin Y, Li J, Guo G, Peng G, Chen C. Collaborative forest fire fighting simulation. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Tianjin, China, 2004, pp. 467-473.
- [3] Smith S, Trenholme D. Rapid prototyping a virtual fire drill environment using computer game technology. *Fire Safety Journal*, 2009, 44: 559-569.
- [4] Shih N, Lin C, Yang C. Virtual-reality-based feasibility study of evacuation time compared to the traditional calculation method. *Fire Safety Journal*, 2000, 34(4): 377-391.
- [5] Dechter R, Judea P. Generalized best-first search strategies and the optimality of A*. *Journal of the ACM*, 1985, 32(3): 505-536.
- [6] Cormen T, Leiserson C, Rivest R, Stein C. *Introduction to Algorithms*, Second Edition. MIT Press and McGraw-Hill, ISBN 0-262-03293-7. Section 24.3: Dijkstra's algorithm, 2001, 595-601.
- [7] Hartzell G, Priest D, Switzer W. Modeling of toxicological effects of fire gases: II. mathematical modeling of intoxication of rats by carbon monoxide and hydrogen cyanide. *Journal of Fire Science*, 1985, 3: 115-128.
- [8] Levin B, Paabo M, Bailey C, Harris S, Gurman J. Toxicological effects of the interactions of fire gases and their use in a toxic hazard assessment computer model. *The Toxicologist*, 1985, 5: 127.
- [9] Reeves W. Particle systems-a technique for modeling a class of fuzzy objects. *ACM Transactions on Graphics*, 1983, 2(2): 91-108.

A Virtual-Reality-Based Study on Fire Evacuation

Tang Fangqin, Ren Aizhu, Xu Feng, Xu Zhen

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, P. R. China

Abstract: The development of virtual reality (VR) technology makes it possible for users to improve the understanding of dangerous scenes from computational simulations. A prototype system-AutoEscape based on the integration of virtual reality visualization and numerical simulation, was developed for human evacuation in fire scenarios. FDS was selected to simulate the fire growth and an evacuation computational engine was designed and implemented based on GIS technology. A VR representation module was constructed, which develops a comprehensive representation for the distributed scenario variables according to numerical results. The case study indicates that the system can help users to form a deep full-scale understanding of fire evacuations, and therefore provide a virtual training environment for emergency evacuation drills and fire rescue command.

Key words: Evacuation simulation; Virtual reality; Fire safety; GIS; Visualization

国内首期订单式 BIM 应用实训班开班

随着以 Autodesk Revit 为代表的三维建筑信息模型 (BIM) 软件在发达国家的普及应用, 国内外先进的建筑设计团队也纷纷成立 BIM 技术小组, 应用

Revit 进行三维建筑设计。为满足广大用人单位的需求, 柏慕进业培训作为 autodesk 中国唯一的教员培训认证机构及官方教材编写单位, 受北京、天津、上海、广州、成都等知名设计企业委托, 采用订单式培养定向型 Revit 三维设计人才。更多详情敬请登陆柏慕培训网 www.51bim.com。

(柏慕培训 黄亚斌)