

7-2-2020

Multiple Disasters Evacuation Perceptual Model Based on Agent Technology

Xuefeng Zhang

School of Computer Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;

Chengjun Zhang

School of Computer Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;

Chenxi Bai

School of Computer Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;

Taiping Jiang

School of Computer Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multiple Disasters Evacuation Perceptual Model Based on Agent Technology

Abstract

Abstract: Various disasters or accidents often reoccur in the process of evacuation. In order to solve the problem of evacuation in multiple disasters, a perceptual model for evacuation was proposed based on multi-agent technology. *By guiding the decision and action of people with mathematical model of disaster and individual perception model, the crowd evacuation stimulation was combined with environment disaster model. It stimulated the perceptive functions such as visual sense, sense of smell, and auditory sense with ray method, gas molecular diffusion formula, and the theory of sound transmission. It analyzed the information of people through stress reaction model and compound decision model.* In the process of evacuation, the travelling speed of people was worked out with the calculation model of velocity, the mental and physiological effect. It's proved that the crowd Evacuati-on model is able to present the situation in multiple disasters veritably.

Keywords

evacuation, agent, multiple disasters, system simulation, sensory function

Authors

Xuefeng Zhang, Chengjun Zhang, Chenxi Bai, Taiping Jiang, and Yuezhong Chu

Recommended Citation

Zhang Xuefeng, Zhang Chengjun, Bai Chenxi, Jiang Taiping, Chu Yuezhong. Multiple Disasters Evacuation Perceptual Model Based on Agent Technology[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 534-541.

基于智能体技术的多重灾难人员疏散感知模型

张学锋, 张成俊, 白晨曦, 姜太平, 储岳中

(安徽工业大学计算机科学与技术学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 人员疏散过程中往往伴随着多种灾难或事故的再次发生。为了解决多重灾难环境下的人员疏散问题, 依据多智能体技术提出了一种人员疏散感知模型。通过建立灾难数学模型和个体感知模型来驱动人员的决策以及行动, 将人员仿真与环境灾难建模结合起来。该模型通过物理射线法、气体分子扩散公式、声音传播原理等算法实现了人员的视觉、嗅觉、听觉等感知功能, 通过应激反应和综合决策等模型实现人员的信息分析功能。疏散过程中人的移动速度通过人群流速度计算模型、心理和生理影响程度来计算。实验结果表明, 该人员疏散模型能够比较真实地表现出在多重灾难环境下的人员疏散情况。

关键词: 人员疏散; 智能体; 多重灾难; 系统仿真; 感官功能

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 03-0534-09

Multiple Disasters Evacuation Perceptual Model Based on Agent Technology

Zhang Xuefeng, Zhang Chengjun, Bai Chenxi, Jiang Taiping, Chu Yuezhong

(School of Computer Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Various disasters or accidents often reoccur in the process of evacuation. In order to solve the problem of evacuation in multiple disasters, a perceptual model for evacuation was proposed based on multi-agent technology. By guiding the decision and action of people with mathematical model of disaster and individual perception model, the crowd evacuation stimulation was combined with environment disaster model. It stimulated the perceptive functions such as visual sense, sense of smell, and auditory sense with ray method, gas molecular diffusion formula, and the theory of sound transmission. It analyzed the information of people through stress reaction model and compound decision model. In the process of evacuation, the travelling speed of people was worked out with the calculation model of velocity, the mental and physiological effect. It's proved that the crowd Evacuati-on model is able to present the situation in multiple disasters veritably.

Keywords: evacuation; agent; multiple disasters; system simulation; sensory function

引言

人员疏散问题是现代社会中一个重要的安全因素, 受到越来越多的重视。采用计算机仿真技术

甚至是虚拟现实技术来研究不同场景中的人员疏散问题是一个比较普遍的方法。在虚拟环境中研究该问题需要考虑多种要素, 比如场景建模、灾难模型、人员运动模型、人物心理活动、人的感知功能等。很多学者从不同角度已经进行了大量研究, 这些研究集中在如何模拟场景当中的人员运动特性, 采用的方法有社会力模型^[1]、元胞自动机模型^[2-3]、智能体模型^[4-7]等。其中基于智能体技术的人员疏



收稿日期: 2014-10-26 修回日期: 2015-01-19;
基金项目: 安徽省自然科学基金(1308085QF113);
作者简介: 张学锋(1978-), 男, 河北石家庄, 副教授, 硕导, 研究方向为计算机仿真与模式识别; 张成俊(1989-), 男, 安徽合肥, 硕士生, 研究方向为计算机仿真技术; 白晨曦(1991-), 男, 河南南阳, 硕士生, 研究方向为计算机仿真技术。

<http://www.china-simulation.com>

散仿真算法应用更为广泛^[4]。比如文献[5]构建了空间宏观离散和基于时空离散的多智能体疏散动力学数学模型, 主要研究火灾的火势和烟气对于人群疏散的影响。文献[6]利用智能体技术结合社会力模型并考虑人物的心理活动, 提出一种改进的路径规划算法, 建立能够正确反映疏散人员行为的 Agent 模型。文献[7]提出一种基于智能体技术的微观仿真模型, 建立由战略级、战术级和动作级反应式三级决策体系, 同时在个体速度上引入反馈机制, 提高了疏散效果。相对于其他疏散研究方法, 智能体技术侧重于个体特性的建模, 以及个体行为随着环境发生动态的变化, 对模型中参数描述简单而准确, 尤其适用于在灾难环境下疏散模型的建立。

上述研究都是以一种灾难为背景进行分析, 本文将考虑火灾、爆炸、有害气体扩散等多重灾难, 并重点分析在疏散过程中再次发生爆炸或火灾等事故时对疏散人群的影响。同时为了更逼真地模拟多重灾难环境中的人员疏散过程, 场景中的每个个体的运动行为要受到人群拥挤程度、心理、生理等因素的影响。这就需要建立人的感知模型, 主要包括视觉、听觉和嗅觉, 根据每个人员所在的实际位置来尽可能真实的模拟该人员在环境中所能感知到的信息。进一步根据人的反应机制以及对环境信息的综合判断能力, 来约束每个人员在疏散过程的运动速度和方向, 从而实现一个较真实的多重灾难人员疏散仿真系统。

1 灾难数学模型

本文分析了爆炸、火灾、有害气体扩散等 3 种灾难模型。爆炸有声音属性, 人员能够根据听到的声音获取的爆炸点的方位和距离。爆炸还有可能引发火灾。火灾会伴随烟气产生, 烟气有蔓延效果, 会升高附近环境温度。泄漏过程中有害气体按照一定的速度向外部扩散, 在场景中不同的位置气体的浓度不一样, 离泄露点越近浓度越高。

爆炸的建模: 为了体现出爆炸的声响强度, 用

声学当中反映声音大小、强弱的最基本参量声压级 L_p 来表示。本文不考虑空气的吸收衰减, 主要考虑声源的扩散衰减。本文利用文献[8]中稳态声压级公式来计算某一位置声压级:

$$L_p = L_w + 101 \lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \quad (1)$$

其中: L_w 为声功率级, 是爆炸的基本属性, 一般情况下 135 以上; Q 为声源在环境当中位置的指向性因子, 当声源在疏散区域中央 $Q=1$, 在一面墙或是地面上 $Q=2$, 在两墙交线处 $Q=4$, 在三墙交点处 $Q=8$; r 为位置 P 与爆炸点直接的距离; R 为环境常数, $R=s\alpha/(1-\alpha)$, α 为疏散区域平均吸声系数, s 为疏散区域总表面积。

火灾的建模: 火势的大小由火源的功率来决定。根据文献[9]建立的火源模型, 将火源模型看做一个圆锥形, 通过火灾的功率计算出火源在地面的火势范围以及火势的高度。

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi Q_e}} \quad (2)$$

$$H = -1.02D + 0.235Q^{2/5} \quad (3)$$

其中: Q 为火灾的功率; D 为火势范围的直径; H 为火势的高度; Q_e 为单位面积的热释放率, 单位 kW/m^2 , 统一取单位面积热释放率 $Q_e=500 \text{ kW/m}^2$ 。

有害气体扩散: 扩散的过程就是气体不断向外围蔓延的过程, 需要确定蔓延的速度。本文根据麦克斯韦提出气体分子的速率分布函数来确定:

$$V = 1.6\sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (4)$$

其中: $M=22.4*$ 气体密度; R 是常数(为 8.31); T 为温度。由于本文讨论的气体多为重气, 所以气体粒子的扩散过程分为几个过程: 初始阶段、沉降和空气卷吸阶段、非重力扩散阶段等。在初始阶段气体从某点泄漏出, 形成气团后在本身的惯性力和风的影响下, 上升变形; 进入沉降和空气卷吸阶段时, 气体动量消失后, 重力占据主导地位, 同时外界的空气进入气团中, 气团被稀释, 与周围环境进行热量交换; 随着气团被稀释, 重力效应越来越小, 此

时变为非重力扩散。假设气体初始泄漏时,其外形呈正圆柱形($H=2R$)或在某规则区域正态分布;初始时刻气团内部的浓度、温度呈均匀分布的,根据文献[10]采用稳定连续点源烟流模式来计算气体浓度:

$$C(x, y, h, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(h-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(h+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (5)$$

其中: C 代表下风向 x 米、横向 y 米,在地面的扩散气体浓度; Q 为泄漏气体释放速率; u 为平均风速; σ_y 为水平扩散参数; σ_z 为垂直扩散参数; H 为泄漏源的有效高度; y 为横向距离; h 代表测量点离地面的高度。

2 人员感知算法

本文所述的感知是疏散系统中人员获取环境信息的过程,主要通过视觉、听觉、嗅觉等感官功能来实现。从物理学的角度来说,现实当中人之所以能看到物体,是因为有光线找到物体上,再由物体将光线折射或者反射到人的眼睛中,最后在人视网膜中成像。所以可用 3D 射线来模拟现实中的光线,进而实现人员的视觉感知。射线是 3D 世界中一个点向一个方向发射的一条无终点的线,在发射的轨迹中,一旦与其他模型发生碰撞,它将停止发射,从中可以获取某条射线发射至哪个对象身上。一般情况下场馆的光线充足(本文暂不考虑光线不充足的情况),可以不考虑反射面的计算,关键就在与光线是否能进入到人眼中这一环节。因此根据人的视角范围来确定射线的发射角度和范围,射线碰到的物体就是人眼能够看到的物体。根据大众认可的常识人眼观察范围,是上方约 60° ,下方略超过 70° ,左右范围大约为 100° ,所以人的横向射线发射范围可以定为 100° ,纵向射线的扫描范围为向上 60° 和向下 60° 。射线碰到的物体的信息(比如出口标志、障碍物、人员、火源、烟气)反馈给人员,就可以实现视觉感知的功能。听觉感知主

要是获取爆炸声的声音来源以及爆炸声响对于人的心理影响程度。本文通过人的双耳效应来确定爆炸声的声音大致方向(对于时间差和相位差暂不考虑,只考虑声级差)。它的原理是如果一个声音来自于听音者正前方的中轴线上,那么这个声音达到双耳的声压级应该也是相等的,所以听音者就会觉得这个声音来自于正前方;如果声音来自于听音者的右侧,那么头部对于声波形成障碍减弱了声音到达左耳的强度,所以便会判断声音来自于右侧;声源偏离正前方中轴线的角度越大,两耳朵的计算得出的声压级差 L 也就越大(当声源在两耳连线上时,声级差可达到 25 db 左右)。人的两只耳朵的坐标是已知的,在发生爆炸时,根据公式(1)可以获取任意一点的声压级 L_p ,可以获取到人两只耳朵感知到的声压级(左耳的为 L_{left} ,右耳的为 L_{right})。人分辨声音前后方主要还是根据耳朵感知到强度差,因为正对耳朵所感知到的声强较大,所以能够直接给出声源在前方还是后方。但是不管声源在前方还是后方,左右方向的判定方法是一致的。假设声源在前方,根据声压判断表来获取感知到的声源方向。

表 1 前方爆炸源方向的判断表

较大的声压级	声压级差/db	感知到方向
L_{left} 或 L_{right}	0~1	正前方
L_{left}	1~20	左前方
L_{right}	1~20	右前方
L_{left}	20 以上	正左边
L_{right}	20 以上	正右边

大多数人在声压达到 130~140 dB 感到耳疼、头痛,即痛域值,也会对人的心理造成不用程度的影响。本文根据经验数据推导出心理影响程度 α 的大致的计算式:

$$\alpha = \left(\frac{L_{left} + L_{right}}{2} - 120 \right) \times \sigma \quad (6)$$

其中 σ 为人员抗压系数,根据生成的人的年龄、性别、性格特征综合决定,人的年龄较大、性格特征较沉稳的男性抗压系数较大。发生爆炸后通过听觉功能,可以获取到人员感知到的爆炸源的方向以及

心理影响程度 α 等数据。气体泄漏发生后, 通过人的位置信息根据公式(3)计算出相应的气体浓度, 获取人所在位置的气体浓度, 以实现人的嗅觉感知。若泄露的气体具备毒气性质, 那么会对人生理造成重大的影响。本文给出了生理影响程度 β 的简单的推算式:

$$\beta = \frac{P_0}{P_0 - P_i} \times \delta \quad (7)$$

其中: P_i 是人员位置处的毒气浓度; P_0 是人能够承受的最大毒气浓度; δ 是人员健康系数, 反应人员的身体抵抗力程度。若 $P_i=0$, 此时 $\beta=1$; 若 $P_i \geq P_0$, 则意味着位于该处的人员已经无法承受毒气, 当场死亡。 β 的值越大, 说明此时人员受生理因素限制的影响就越大, β 最小为 1, 此时人员处于生理最佳状态。

3 人员智能分析

人员智能分析分为 3 块: 人员应激反应、综合决策、约束。人员应激反应主要是人员面对突如其来的威胁时做出的条件反射动作的过程, 主观推理则是人员获取信息后经过大脑思考分析后做出最有利自我的决策过程, 约束主要是根据周边环境以及自身心理和生理条件确定人员的移动速度。图 3 人员智能分析流程图体现了人在获取感官信息后的分析流程。

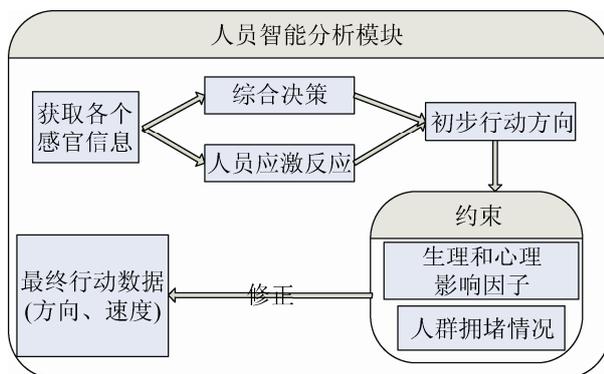


图 1 人员智能分析过程图

人员应激反应是人的趋利避害的本能反应, 根据每种灾难的特点确定出人员对灾难的反应。表 2

反应了人员会如何应对这些刺激源。在有利源的情况下, 向刺激源方向修正; 在有害源的情况下, 向偏离刺激源方向修正的角度根据刺激源类型分别讨论。爆炸是根据心理影响程度 α 来决定, α 越大修正角度也越大, 火源是根据离火源的距离 D 来决定, 距离越小, 修正的角度越大。当多种刺激源下, 人的根据人的求生心理, 遵循尽量逼近有利源, 保证离有害源足够大距离的原则, 进行处理, 如果没有办法保证安全距离, 那么只能放弃对有利源逼近。

表 2 人员应激反应处理对应表

刺激源	偏离方向	偏离角度
有利(如出口、通风口)	朝着有利点方向	修正角度为行进方向和有利点方向的夹角
爆炸点	远离爆炸点方向	偏离角度为 $k_1 \times \alpha$ (k_1 为偏离系数)
火灾点	远离火灾点方向	偏离角度为 $k_2 \times D$ (k_2 为偏离系数)

应激反应属于人遇到突然性灾难刺激后的第一反应, 一般情况下需要人的分析判断来确定下一步行动。根据人员感知到的环境数据, 来判断出人员的脱逃方向。在人员疏散过程中, 人员的决策会与根据环境的变化紧密相连, 可将人员在疏散当中的决策行为分为 3 种模式, 分别为直奔模式、跟随模式、寻觅模式。直奔模式, 是在人员看到了安全的出口, 进行出口的选择, 将出口的方向直接作为人员的行进方向。每个个体需要有明确出口目标的情况下才能进入到该模式。首先进行出口的选择(可供选择的出口都是被认为是安全的出口), 然后计算从自身位置到出口位置的大致方向。出口的选择是通过预估的个体疏散所需时间来评估出口, 即疏散时间越短, 选择该出口的概率就越大, 而疏散所需时间是根据出口的距离与出口的拥堵程度来衡量。在文献[3]研究成果的基础上, 推导出考虑人员速度的疏散时间计算公式:

$$t = \frac{d}{v} + \frac{p}{w} \quad (8)$$

对于出口 i 来说, 计算疏散时间的公式如下,

其中： t 代表疏散时间； d 代表人员距出口的距离； v 代表人员的当前速度； p 代表在观察到的人员当中距离出口 i 更近的人数； w 代表出口的宽度。

跟随模式，是在人员感知不到出口信息但是获取到人群信息时，将人群的行进方向作为人员行进方向，暂时性跟随人群行进。这种模型比较符合人的从众心理，需要感知到其他人员信息。基本思想是获取看到的人群信息，根据人的运动方向(面向角度)进行聚类，然后选择群体最多的一个类群，将这个类群离自己最近的人员的位置作为目标点。在行进到目标的过程中，如果获取到的新的人群集合超过跟随的人员数2倍以上，那么就放弃跟随原来的人群类，选择新人群中最近的一个人作为目标。

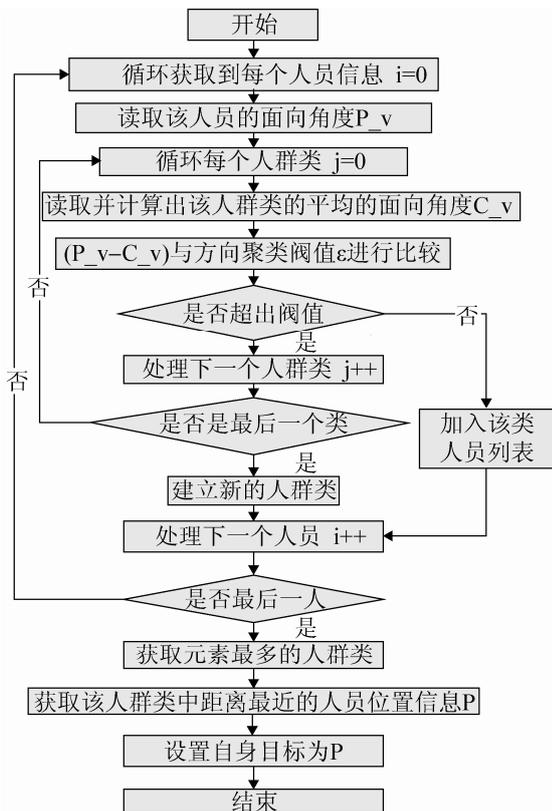


图2 综合决策跟随模式流程图

寻觅模式，是在疏散过程中对于某些孤立的人员进行的探索式前进模式。这种情况下，这些人员没有感知到出口和人员，只能对环境进行一些摸索，直到发现有价值的目标。由于人的思维定势效应的影响，在寻觅中会靠着墙壁或者是障碍物之间

的通道前进。人员在碰到“死路”的时候，需要立即变更搜索的方向，尽早脱离已经走过的路径，继续搜索新的路径。在碰到有人或者是出口的目标的时候，根据人的求生心理，会立即将这个目标作为下一步的行动方向。在行进的过程中，随着环境的变化，模式也需要进行相应的切换。各个模式之间的转换需要满足一定的条件，在获取到的环境数据达到转换条件时，则进入相应的模式，模式转换示意图见图3所示。

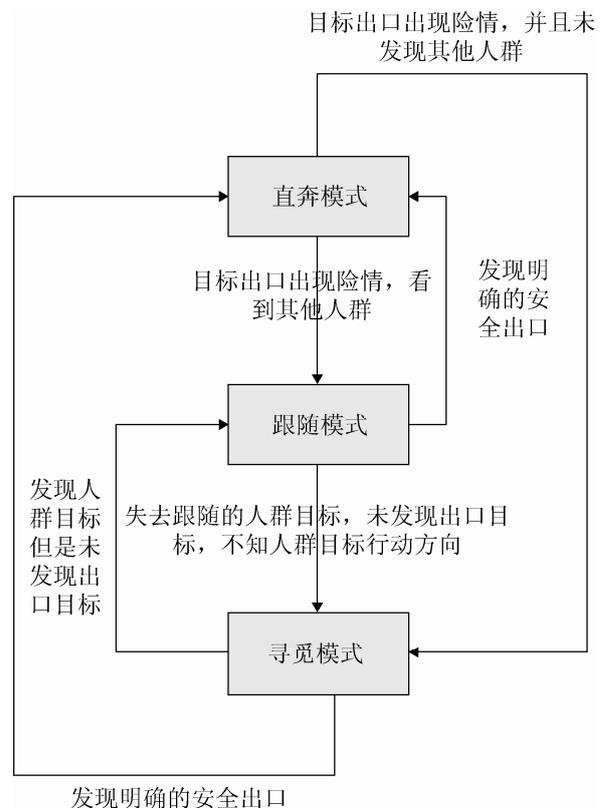


图3 人员决策模式转换示意图

在人员行进过程中，人员的速度受到环境和自身的种种约束。要确定人员的移动速度，首先需要确定人在不受其他因素干扰的情况下的速度，即基本移动速度。然后将从生理和心理两个方面对此基本速度进行相应的修正，最终得到个体实际运动速度。根据文献[4]所提到的计算公式，可计算出人在疏散过程中的人的基本速度(用 V_a 表示)。

$$V_a = \frac{V_0 \sqrt{1/A_0 - 0.25}}{0.87} \quad (9)$$

出口，出口宽度为 3 m，疏散人员有 35 人。为了能够更好的说明人员疏散系统的有效性，系统总共进行 3 种情况下的人员疏散模拟，其中表 3 列出了疏散模拟实验的灾难设计。每种情况的疏散模拟在初始阶段的场馆中间区域都会出现火灾，并开始伴随烟气的产生，在疏散进行一段时间后中心区域有害气体都会开始扩散。到了疏散的后期，第 2 种情况的模拟，会在非关键区域发生突然性的爆炸；第 3 种情况的模拟，会在关键区域发生突然性的爆炸。这里关键区域是指出口附近区域或是中心疏散通道，非关键区域就是不影响人员疏散路径的区域。

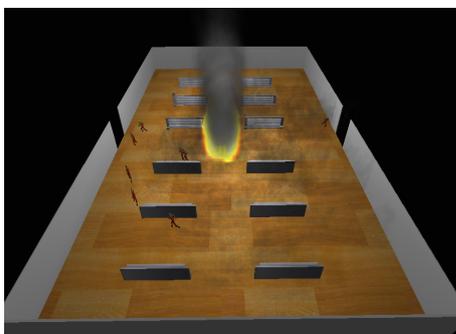
表 3 仿真演示灾难设计

灾难类型	灾难发生区域	属性
火灾	中心区域	火灾功率 $Q=10\text{ MW}$
爆炸	关键或非关键区域	声功率级 $L_w=160$
有害气体扩散	中心区域	气体释放速率 $Q=1.0\text{ kg/s}$ 风速: 0.0 m/s
火灾	爆炸区域	火灾功率 $Q=5\text{ MW}$

图 5~7 是人员疏散系统模拟事故的演示。

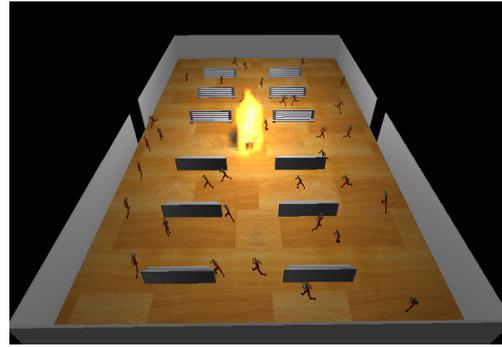


(a) 中心区域发生火灾

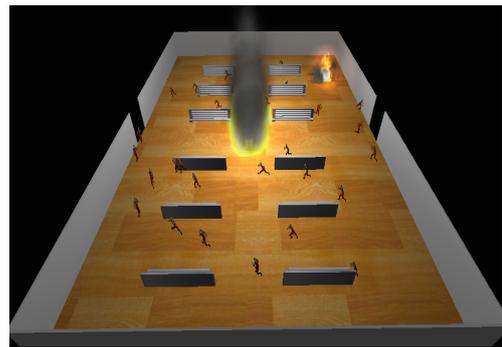


(b) 中心区域有害气体扩散

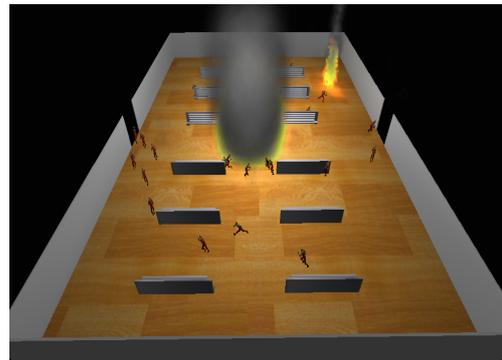
图 5 第 1 种情况模拟演示图



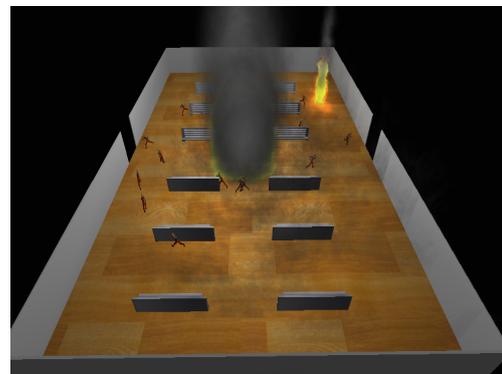
(a) 中心区域发生火灾



(b) 在场景右上角出现爆炸

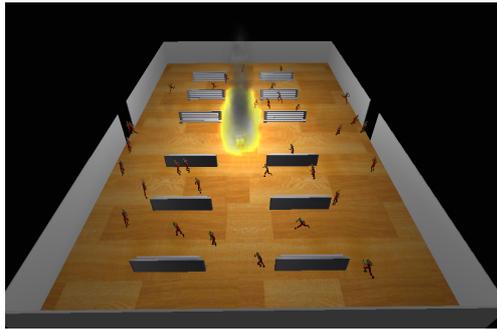


(c) 爆炸区域内产生火灾

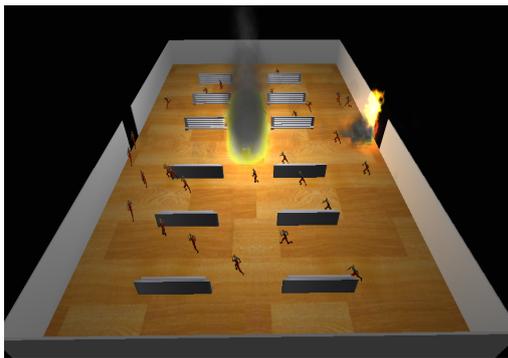


(d) 中心区域有害气体扩散

图 6 第 2 种情况模拟演示图



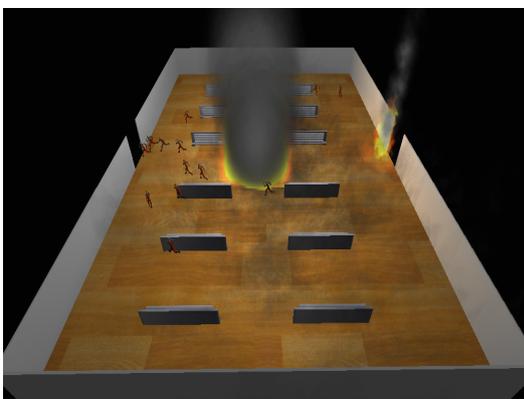
(a) 中心区域发生火灾



(b) 在右边出口附近出现爆炸



(c) 爆炸区域内产生火灾



(d) 中心区域有害气体扩散

图 7 第 3 种情况模拟演示图

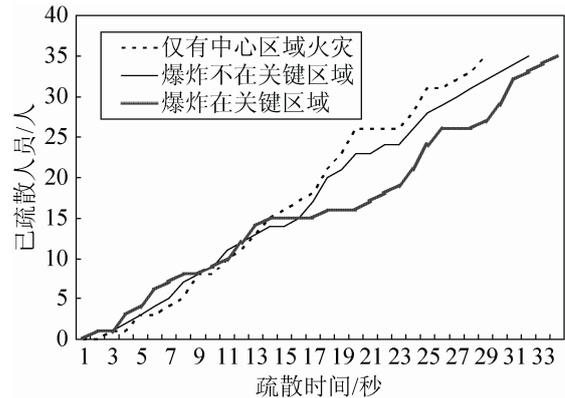


图 8 人员疏散实验过程比较曲线图

将以上 3 种情况下模拟实验的数据进行比较, 并绘制出如上的曲线图。从图中不难发现, $t=14$ s 时, 是后 2 种情况模拟发生突然性爆炸事故的時刻, 3 只曲线开始有明显的不同。第 2 种情况下, 爆炸发生在非关键区域, 对疏散略有影响, 分析得出此时爆炸影响了疏散人员的心理, 进而影响到人的移动速度及方向。第 3 种情况下, 爆炸发生在出口附近的区域, 对疏散产生很大的影响, 主要是因为此时不仅仅影响了疏散人员的心理, 还使得人员不得不放弃原来目标出口, 重新寻找下一个出口。另外在这 3 次模拟中, 在疏散后期都有一段时期疏散效率比较低, 比如虚线的 19~20 s, 实线的 19~22 s, 圆圈线的 25~27 s, 主要是因为中心区域的烟气蔓延达到一定的规模, 人员此时正好通过烟气蔓延区域, 视觉判断以及生理因素受到了影响, 造成疏散的效率低下。总体来说, 该系统很好的展现了灾难环境对人员疏散的影响, 提高了人员疏散的仿真效果。

6 结论

本文着重研究在多重灾难环境下的人员疏散仿真, 并建立了人员疏散感知模型。相对于国内外基于感知模型的人员疏散研究, 本文将人与环境看作一个彼此有紧密联系的整体, 从人感知的角度将环境和人的感知疏散研究结合起来, 很好的描述了环境中灾难对人员疏散的影响。此外开发出的人员疏散仿真系统, 仿真结果符合实际情况, 可以直观

(下转第 568 页)

- Support Real—Time Database [D]// Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Applied Mathematical Sciences. USA: University of Rhode Island, 1995.
- [11] Azer Bestavros, Kwei-Jay Lin, Sang Hyuk Son. Real-time database systems: Issues and applications [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] Pugh W, Marlow. Compiler and tool support for real—time systems [C]// Proceedings of the ACM SIGPLAN workshop on language, ACM SIGPLAN. USA: ACM, 1994.
- [13] Ramamritham K. Real—time databases [J]. International Journal of Distributed and Paralled Databases (S0926-8782), 1993, 1(2): 199-226.
- [14] Jeffrey Dean, Sanjay Ghemawat, MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters, Operating Systems Design and Implementation [J]. Communications of the ACM (S0001-0782), 2008, 51(1): 107-113.
- [15] Apache Software Foundation. HDFS Users Guide [EB/OL]. (2014-08-01) [2014-07-20]. <http://hadoop.apache.org/docs/stable/hadoop-project-dist/hadoop-hdfs/HdfsUserGuide.html>
- [16] Ghemawat S, Gobiuff H, Leung S-T. The Google file system [C]// Proc. of the 19th ACM SOSP (Dec. 2003). USA: ACM, 2003: 29-43.
- [17] Opentsdb.net. OpenTSDB - A Distributed, Scalable Monitoring System [EB/OL]. (2014) [2014-08-30]. <http://opentsdb.net/>.
- [18] Chang F, Dean J, Ghemawat S, et al. Bigtable: A Distributed Storage System for Structured Data [J]. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS) (S0734-2071), 2006, 26(2): 205-218.
- [19] Paul Zikopoulos, Chris Eaton. Understanding Big Data: Analytics for Enterprise Class Hadoop and Streaming Data [M]. USA: McGraw-Hill Osborne Media, 2011.
- [20] N Dimiduk, A Khurana, MH Ryan, et al. HBase in Action [M]. USA: O'Reilly Media, 2012.
- [21] Yifeng Jiang. HBase Cookbook Administration. Birmingham [M]. UK: PACKT Publishing, 2012.

(上接第 541 页)

了解多重灾难环境下疏散人群的实时动态,分析疏散中人员运动规律,有助于各类灾难环境下人员疏散的研究工作。

参考文献:

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T, et al. Simulating Dynamical Features of Escape Panic [J]. Nature (S0028-0836), 2000, 407(6803): 487-490.
- [2] Varas A, Cornejoa M D, Mainemera D, et al. Cellular automaton Model for Evacuation Process with Obstacles [J]. Physica A (S0378-4371), 2007, 38(2): 631-642.
- [3] 刘磊, 刘群, 高铁, 等. 多出口条件下基于排队时间的疏散仿真研究 [J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 349-352.
- [4] 徐高. 基于智能体技术的人员疏散仿真模型 [J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 301-303.
- [5] 史建勇, 任爱珠. 基于智能体的大型公共建筑人员火灾疏散模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5677-5681.
- [6] 陈佳俊, 安晓宇, 蔡希辉, 等. 基于 Agent 的人员疏散系统设计与实现 [J]. 计算机工程, 2010, 36(14): 264-266.
- [7] 黄希发, 王科俊, 郭莲英, 等. 基于 Agent 技术的人员疏散微观仿真模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4568-4572.
- [8] 朱哲民, 龚秀芬, 杜功焕. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 430-432.
- [9] 白音, 杨海勇, 石永久, 等. 大空间结构各种火灾场景下的温度场分布 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(8): 1122-1127.
- [10] 周曲波. 用 $r(x)$ 函数推导高斯烟流模式 [J]. 环境科学研究, 1992, 5(1): 51-52.
- [11] 江辉仙, 林广发, 江立辉, 等. 校园楼宇火灾疏散路径分析和应用 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2171-2177.
- [12] Stahl F. BFIREs-II, A Behavior Based Computer Simulation of Emergency Egress During Fires [J]. Fire Technology (S0015-2684), 1982, 18(1): 49-65.