

# 基于 Agent 的三维巷道人员疏散仿真研究

杨瀚申<sup>1,2</sup>, 徐 华<sup>2</sup>, 鞠志伟<sup>1,2</sup>

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029;

2. 北京石油化工学院 信息工程学院, 北京 102617)

**摘 要:** 在三维巷道中发生灾害事故时, 人员疏散是一个复杂的过程。通过对地下巷道人员的安全疏散分析, 提出了三维巷道中人员应急疏散仿真的系统构架。对 Agent 的个体属性进行定义, 并设定 Agent 的感知系统、决策系统以及行为系统。根据在应急疏散过程中不同区域的人员密度, 计算 Agent 的疏散速度; 基于变权的 A\* 算法搜索疏散最短路径, 并确定 Agent 在巷道中的实时位置; 根据 Agent 周边情况, 对 Agent 之间以及 Agent 与巷道之间进行碰撞检测与响应。在此基础上, 基于 OpenGL 构建三维巷道和人员模型仿真虚拟场景, 进行应急疏散可视化模拟仿真, 并对仿真结果进行评估分析。实例应用表明, 该系统可有效地仿真三维巷道人员应急疏散动态过程, 为事故灾害发生前的疏散模拟演练和灾害发生时的应急救援提供技术支持。

**关键词:** 三维巷道; 人员模拟; 应急疏散; Agent 模型; 可视化仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)03-0132-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.03.028

## Simulation and Research on 3D Tunnel Pedestrian Evacuation Based on Agent

YANG Han-shen<sup>1,2</sup>, XU Hua<sup>2</sup>, JU Zhi-wei<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. School of Information Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** Evacuation is a complex process when the accident is occurred in three dimensional tunnel. By analyzing of the safety evacuation of the workers, we put forward a system framework of the emergency evacuation simulation in the three-dimensional tunnel. The individual attributes of Agent are defined and the perception system, decision-making system and behavior system of Agent are set. According to the density of crowd in the different area during the emergency evacuation process, the evacuation speed of Agent is calculated. The A\* algorithm with variable weight is used to search for the optimal evacuation route. The real-time location of the Agent in the tunnel is determined while the person is evacuating. According to the surrounding situation of Agent, the collisions between Agent and Agent, between Agent and laneway can be detected and responded. Based on OpenGL, the three dimensional tunnel and person model simulation virtual scene can be built. The visual simulation of emergency evacuation is carried out, and finally the simulation results are evaluated and analyzed. The application in the tunnel shows that it can effectively simulate the emergency evacuation process of underground tunnel, which provides technical support for evacuation exercise before disaster and emergency rescue when the disaster is occurred.

**Key words:** three-dimensional tunnel; person simulation; emergency evacuation; Agent model; visualization

## 0 引 言

随着地下交通隧道、地下矿井巷道、地下管网等的普及与发展, 安全问题也越来越重要。当发生事故灾害时, 如何快速将人员疏散到安全区域是应急疏散仿

真的关键技术问题。国内外关于人员疏散方法已进行了很多研究<sup>[1]</sup>, 提出了元胞自动机模型、势能场模型、社会力模型和 Agent 模型等。利用元胞自动机模型对室内疏散引导进行了研究<sup>[2-4]</sup>; 并通过势能场对室内

收稿日期: 2018-04-06

修回日期: 2018-08-14

网络出版时间: 2018-12-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801800); 国家自然科学基金(41430318)

作者简介: 杨瀚申(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机应用; 徐 华, 教授, 硕士生导师, 研究方向为虚拟现实、可视化。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181219.1511.036.html>

人员的运动轨迹仿真进行了验证<sup>[5]</sup>。张开冉等<sup>[6-8]</sup>研究了基于社会力模型对公共场合内人员的疏散问题; 张学锋等<sup>[9-11]</sup>将 Agent 模型与所处环境因素相结合, 描述了环境对疏散的影响。

目前在疏散问题研究中, 大多数都是针对诸如建筑物内或者城市大型公共场所内的疏散仿真, 而对于地下受限空间的疏散研究较少。地下受限空间内的疏散受到多因素影响, 是一个复杂的过程。

文中以矿山巷道为例, 基于 Agent 模型对巷道内的人员进行建模; 通过人员应急疏散分析, 确定三维巷道内 Agent 的疏散速度、所处位置等, 基于变权的 A\* 算法对三维巷道模型进行搜索, 获得最短疏散路径, 并进行疏散时间等评估分析。通过对 Agent 之间以及 Agent 与巷道之间进行碰撞检测和碰撞响应, 以确保仿真的真实性。

## 1 模型构建

### 1.1 三维巷道模型

基于地下巷道的二维数据, 通过插值技术将其转化为三维空间数据, 利用 3ds max 等工具对巷道进行构建, 得到三维巷道模型, 并导入仿真系统, 作为人员应急疏散的虚拟仿真场景。

### 1.2 人员模型

为了实现人员在三维巷道中的疏散模拟, 采用 MD2 模型生成人员模型, 并导入到三维巷道模型中。

MD2 模型是一种经典的、拥有多种人员动作形态的三维动画模型文件, 可以用 OpenGL、DirectX、Glide 等多种函数库对其进行再现或者重构。MD2 模型中包含了步行、跑动、受伤、倒下、蹲伏等多种动作行为, 在应急疏散模拟过程中, 根据人员和环境的不同情况, 需要设定相应的动作行为, 如在突水灾害发生时, 可根据水位高度、水流速度等因素, 确定撤离人员的动作行为。MD2 模型中对每帧动作都存有特定的顶点信息和纹理坐标, 在进行重构处理时, 需要读取关键帧动画并且进行关键帧之间的插值, 在关键帧之间自动生成过度帧, 使人员模拟的动作连续且光滑。

## 2 应急疏散方法

### 2.1 Agent 属性及定义

将巷道内人员作为疏散智能个体 Agent, 对其进行建模。在疏散过程中, Agent 的属性可以由 Agent 定义描述如下:

Agent = { ID,  $x, y, z, \theta$ , speed, sightrange, time, path, direction, density, age }

其中 ID 为 Agent 的编号;  $x, y, z$  为 Agent 的坐标位置;  $\theta$  为 Agent 的前进方向; speed 为 Agent 的移动速

度; sightrange 为 Agent 的视野范围; time 为 Agent 疏散所用时间; path 为 Agent 的疏散路径; density 为 Agent 周边的人员密度; age 为 Agent 的年龄。

### 2.2 个体 Agent 行为

#### (1) 感知系统。

感知是指 Agent 获取周边环境的状态, 并将其映射为自己内部状态的一种能力。Agent 通过感知外界环境, 获取外界信息, 对之后的行为决策和行动方式有着决定性的作用。

文中通过对 Agent 的视觉系统建模, 用来模拟人类眼球的功能, 对周围的环境进行信息收集。

#### (2) 决策系统。

Agent 决策系统是 Agent 模型的核心部分。Agent 自身属性、疏散环境、疏散目标都会对 Agent 的决策产生影响。决策部分主要由 Agent 疏散路径规划组成。

巷道内应急疏散行为开始时, Agent 位置的确定可以通过 Agent 定位系统或者交互式工具获得。

疏散路径的确定是通过提取巷道底部的中线, 获取巷道的拓扑结构, 以 Agent 当前所在位置为搜索起点, 疏散出口为疏散终点, 结合来自物联网的实时数据, 以三维巷道空间分布、Agent 行走动态距离、Agent 疏散速度、灾害相关因素等为权值, 基于变权的 A\* 算法<sup>[12]</sup>搜索疏散最短路径, 并将获得的疏散路径作为 Agent 的逃生路线。

#### (3) 行为设定。

##### (a) Agent 疏散速度计算。

Agent 的移动速度是疏散模型中 Agent 行为中最基本的要素。由于三维巷道环境空间狭小, 环境比较恶劣, 因此在这种环境下, 地下巷道人员在危急时刻总会以最快速度向安全出口移动。但是此时, Agent 速度影响因素较多, 如水位、水流、巷道坡度、巷道拥塞、人员密度等。文中主要讨论人员密度对速度的影响。

人员密度由单位面积内的人数来确定。

Agent 疏散速度与人员密度的关系可以用式 1 来确定。

$$v_i = 1.867D^4 - 6.333D^3 + 7.233D^2 - 3.617D + 0.95 \quad (1)$$

其中,  $v_i$  为 Agent 中第  $i$  个人的速度, 单位为 m/s;  $D$  为人员密度。

人员密度由单位面积上的人数来确定, 反映了人员的拥挤程度, 表示为:

$$D = \frac{NA_p}{WL} \quad (2)$$

其中,  $N$  为单位面积内的 Agent 数量;  $A_p$  为单个 Agent 的水平投影面积;  $W * L$  为单位面积;  $0 < D \leq 0.92$ 。

(b) Agent 位置实时计算。

由于巷道内部拓扑节点距离狭长,为了增强 Agent 在巷道内移动的真实性,提升观察 Agent 在巷道内疏散的可视化效果,避免视觉抖动和 Agent 跳跃现象,通过读取拓扑节点  $L_1, \dots, L_i, L_{i+1}, \dots, L_n$ ,在两两节点之间进行线性插值及 Cardinal 插值<sup>[13]</sup>。计算两个拓扑节点之间的距离,设插值距离为  $\Delta d$ ,计算需要插值的点的个数,则在节点之间会获得多个插值点  $M_{ik}, M_{ik+1}$  的位置及其坐标。在疏散过程中,由于给定的疏散路径上的两两坐标点的距离  $\Delta d$  已求得,只需根据单位时间  $\Delta t$  内移动的距离来计算 Agent 移动后的坐标。

设 Agent 当前位置为  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , Agent 下一时刻的位置坐标  $P'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$  计算方法如下:

step1: 根据 Agent 移动速度  $v_i$ , 经过单位时间  $\Delta t$ , 求得走过的距离  $d_i$ ;

step2: 根据  $d_i$  计算走过的插值点的个数  $n$  和到新的身后插值点的距离  $d_p$ ;

step3: 根据新的身后插值点  $M_{ik}(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik})$  和该插值点下一点  $M_{ik+1}(x_{ik+1}, y_{ik+1}, z_{ik+1})$  和  $d_p$  进行插值, 设 Agent 下一时刻的位置坐标  $P'_i$  可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{x'_i - x_{ik}}{x_{ik+1} - x_{ik}} = \frac{y'_i - y_{ik}}{y_{ik+1} - y_{ik}} = \frac{z'_i - z_{ik}}{z_{ik+1} - z_{ik}} \\ (x'_i - x_{ik})^2 + (y'_i - y_{ik})^2 + (z'_i - z_{ik})^2 = d_p^2 \end{cases} \quad (3)$$

求得:

$$x'_i = x_{ik} + \frac{d_p \times (x_{ik+1} - x_{ik})}{(x_{ik+1} - x_{ik})^2 + (y_{ik+1} - y_{ik})^2 + (z_{ik+1} - z_{ik})^2} \quad (4)$$

$$y'_i = y_{ik} + \frac{d_p \times (y_{ik+1} - y_{ik})}{(x_{ik+1} - x_{ik})^2 + (y_{ik+1} - y_{ik})^2 + (z_{ik+1} - z_{ik})^2} \quad (5)$$

$$z'_i = z_{ik} + \frac{d_p \times (z_{ik+1} - z_{ik})}{(x_{ik+1} - x_{ik})^2 + (y_{ik+1} - y_{ik})^2 + (z_{ik+1} - z_{ik})^2} \quad (6)$$

Agent 实时位置的计算如图 1 所示,其中箭头所指方向为 Agent 的前进方向。

### 2.3 评估分析

评估分析主要包括疏散时间、出口处通行系数、巷道交汇处 Agent 汇集程度以及灾害对 Agent 疏散影响等。

(1) 疏散时间。

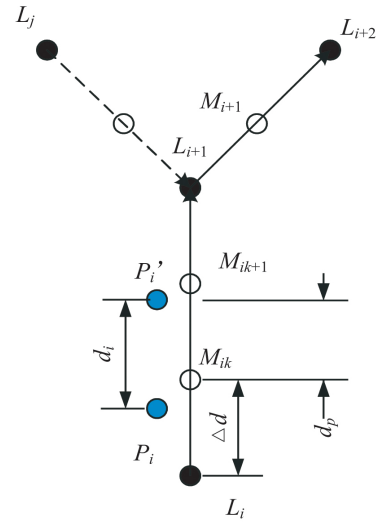
当巷道内发生危险状况后, Agent 能否安全疏散

取决于离开巷道时的疏散时间。

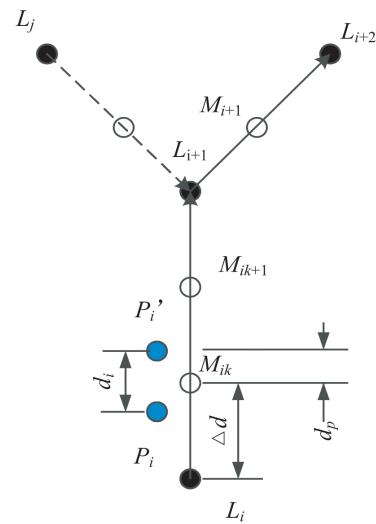
第  $i$  个 Agent 的疏散时间可以表示为:

$$t_i = t_p + t_e \quad (7)$$

其中,  $t_p$  为 Agent 的疏散延迟时间;  $t_e$  为疏散到安全区域所需时间。



(a)  $d_i > \Delta d$  的移动情况



(b)  $d_i < \Delta d$  的移动情况

图 1 Agent 位置计算

整体疏散时间  $t_{\max}$  由最后一个疏散离开的 Agent 的疏散时间决定, 设疏散总人数为  $m$ , 则

$$t_{\max} = \max\{t_i\}_{i=1, 2, \dots, m} \quad (8)$$

(2) 出口处通行系数。

出口处通行系数  $N_{\text{eff}}$  受限于出口宽度, 每秒钟从出口疏散出去的人数是基本不变的, Agent 通过出口的速度与该出口的宽度和通行系数有关。通行系数是指单位时间内通过出口的人数。通行系数和人员密度密切相关, 当密度增大到一定程度时, 就会因为道路阻塞而导致停止流动的现象, 因此需要将出口宽度设计成合理的距离。

通行系数  $N_{\text{eff}}$  与人流密度  $D$  的关系可由式 9 表示:

$$N_{\text{eff}} = 1.34D(1 - e^{-1.93(\frac{1}{D} - \frac{1}{5.4})}) \quad (9)$$

### (3) 巷道交汇处 Agent 汇集程度。

在巷道交汇处,由于在不同巷道分支内的 Agent 对其他巷道分支内的人员情况未知,当出现 Agent 大量出现在巷道交汇处时,会导致 Agent 发生碰撞,减缓疏散速度,影响疏散效率。

### (4) 灾害对 Agent 疏散的影响。

水流、烟气等灾害对 Agent 疏散产生影响。例如,巷道内突水情况也会影响 Agent 的疏散。突水位置、水位、水流速度、水流路径会对 Agent 的疏散路径选择、疏散速度等造成影响。巷道内发生火灾时,由于会产生大量的烟气,会对 Agent 的视野、路径的选择等造成一定影响,影响疏散效率。

## 3 仿真设计

### 3.1 系统构架

三维巷道中人员应急疏散仿真系统由四部分构成,如图 2 所示,分别是三维模型构建、路径生成、可视化仿真、评估分析。

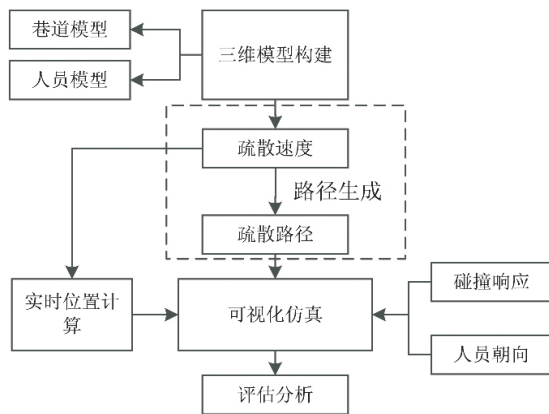


图2 系统架构

三维模型由三维巷道模型和人员模型组成,作为三维巷道中人员应急疏散仿真场景。根据 Agent 和巷道的具体情况确定 Agent 的疏散速度,由基于变权的 A\* 算法生成 Agent 的最短疏散路径。

可视化仿真由 Agent 之间以及 Agent 与巷道的碰撞响应、Agent 在巷道内朝向、Agent 在不同环境下的工作改变和 Agent 在巷道内的位置确定组成,根据这些数据对 Agent 进行处理并生成实时三维场景。其中 Agent 的朝向是根据该 Agent 疏散路径上的前进方向来确定。

### 3.2 碰撞检测与响应

#### (1) Agent 之间碰撞检测与响应。

设定每个 Agent 的直径为 0.5 m 且可视为圆形,

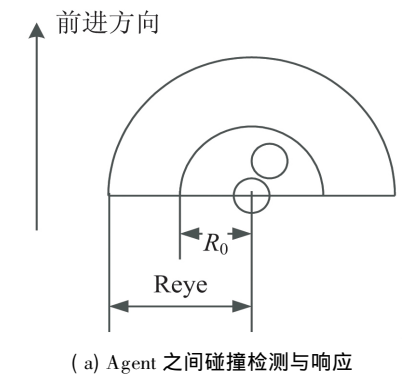
当 Agent 与 Agent 之间的距离小于 0.5 m 时,即可视为两 Agent 之间发生碰撞。这时,需要对 Agent 在疏散时两两之间的碰撞响应做出判别,并做出相应的调整,如图 3(a) 所示。

处理 Agent 之间的碰撞方法:通过 Agent 的感知系统,模拟人员的视野,其半径为  $R_{\text{eye}}$ ,设定 Agent 的最小规避半径  $R_0$ ,其中  $R_0 > 0.5$  m。如果有其他 Agent 进入该范围,则该 Agent 减速或者停止前进。当该范围内没有其他 Agent 出现时,该 Agent 恢复原来的速度继续前行。

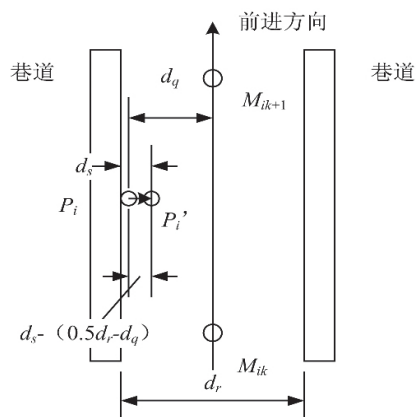
#### (2) Agent 与巷道之间碰撞检测与响应。

为了确保疏散模拟的准确性,需要对 Agent 与巷道之间的碰撞做出相应的处理。假设巷道宽度为  $d_r$  m,设定当 Agent 与巷道之间的距离不得小于  $d_s$  m。

处理 Agent 与巷道墙壁的碰撞方法:当 Agent 与巷道墙壁的距离小于  $d_s$  m 时,根据该 Agent 的坐标点  $P_i$  和所在疏散路径上的两个插值点  $M_{ik}$  和  $M_{ik+1}$ ,求其到线段  $M_{ik}M_{ik+1}$  的距离  $d_q$ ,之后将其向巷道中心线偏移  $d_s - (0.5d_r - d_q) + \varepsilon$  的距离,其中,  $\varepsilon$  取  $[0, 0.5]$  之间的一个随机值。求交点坐标  $P_i'$ ,即可视为该人员的新的坐标点,如图 3(b) 所示。



(a) Agent 之间碰撞检测与响应



(b) Agent 与巷道的碰撞检测与响应

图3 碰撞检测与响应

## 4 应用实例

以河北某矿井为例,该矿井南北长度约为 10 km,

东西长度约为 5 ~ 8 km ,面积约为 52 km<sup>2</sup> ,巷道宽度为 4.6 m。

采用 Visual Studio 2010 ,利用 MFC 设计各功能菜单实现与用户的交互 ,以 OpenGL 进行图形绘制实现可视化。

通过最短路径搜索 ,可以获得三维巷道内 Agent 的疏散路径 ,其中两条路径如图 4 中黑线所示。

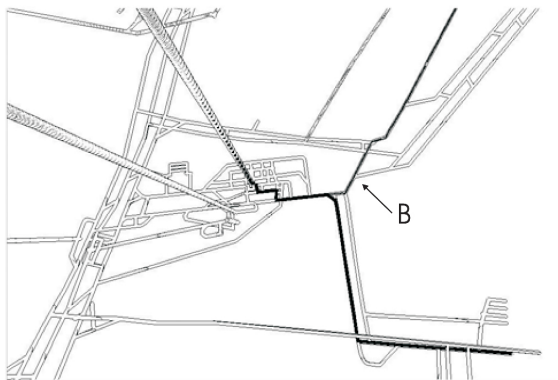


图 4 疏散路径生成

在巷道内随机分布 100 人进行疏散仿真模拟 ,并对巷道交汇处有不同数量 Agent 的疏散情况进行模拟 ,通过图 4 的巷道交汇处 B 进行观察。

图 5 (a) ~ (c) 为巷道中的 Agent 在通过巷道交汇处 B 的动态模拟过程 ,展示了其中 3 个关键帧的结果。在巷道内的实际疏散过程中 ,Agent 是面朝自身前进方向的 ,图 5 (a) 和图 5 (b) 分别表示 Agent 在进入巷道交汇处之前和交汇处时的情况 ,通过可视化结果可以看出 ,在拐角处 Agent C<sub>1</sub> 发生转向 ,面朝自身的前进方向 ;而 Agent C<sub>2</sub> 在通过巷道交汇处时面朝方向不变 ,与前进方向一致 ,符合实际情况。在实际疏散过程中 ,当人数较多时 ,会发生碰撞 (如图 5 (d) 所示) ,通过 “Agent 之间碰撞响应” 算法 ,可使 Agent 之间发生碰撞后产生一个位移 ,相互间避开一段距离 ,保证自身不受挤压 (如图 5 (c) 所示) 。图 5 (e) 为巷道内 Agent 疏散仿真模拟结果图 ,以便观察巷道内 Agent 疏散情况。

图 5 (f) 为在图 4 所示巷道交汇处 B ,多个 Agent 相遇时 Agent 的速度比较分析 ,当在巷道交汇处 Agent 数量逐渐增加、人员密度增大时 ,每个 Agent 的疏散速度会有所降低。以图 5 (a) 为例 ,在交汇前 ,两处巷道分支各有 5 个 Agent ,当 10 个 Agent 汇聚在一起的时候 ,导致它们在巷道交汇处的密度增大 ,根据式 1 ,Agent 的疏散速度由 0.59 m/s 降低至 0.29 m/s (如图 5 (f) 所示) ,导致疏散效率降低。经过一段时间 ,由于会有部分 Agent 脱离之前汇聚在一起的小群体 ,密度有所降低 (如图 5 (c) 所示) ,根据式 1 ,计算得出 Agent 的疏散速度由 0.36 m/s 提升至 0.51 m/s ,如图 5 (f) 18 s 的时刻所示。

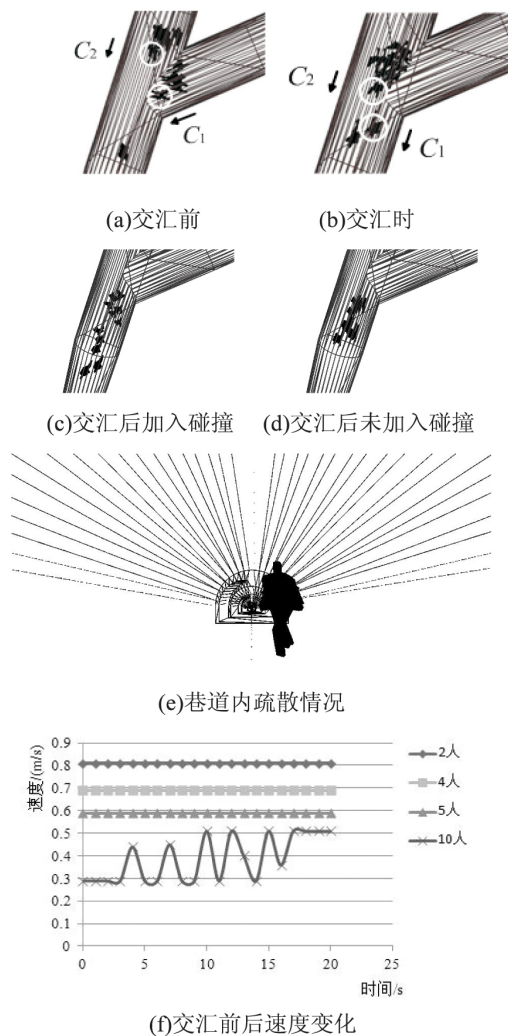


图 5 巷道交汇处疏散情况

对多人单出口和多人双出口的疏散情况进行模拟仿真 ,得到的最终疏散时间如图 6 所示。

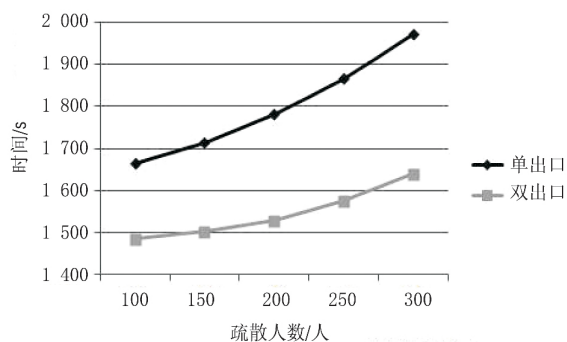


图 6 不同人数不同出口数量疏散时间

从表中的数据可以看出 ,当人员数量有所提升时 ,双出口疏散条件下所用的疏散时间比单出口所用疏散时间少很多 ,而且增加出口数量有利于降低总体的疏散时间。因此在三维巷道内的疏散过程中 ,应当保证当有应急情况发生时有多出口保持畅通 ,就会提升疏散的效率和安全性 ,避免人员离开巷道时因出口数量不足影响生命安全。

## 5 结束语

研究了以 Agent 模型实现三维巷道中人员应急疏散仿真的主要技术方法,分析了人员密度对疏散速度的影响,人员疏散过程中实时位置的确定。采用 OpenGL 技术,实现了三维巷道人员疏散的三维动态可视化仿真,可以观察 Agent 的形态、转向、碰撞等行为,反映 Agent 在应急疏散时的真实情况。通过疏散时间等计算对应急疏散仿真结果进行评估分析,能够指导 Agent 分流,避免在巷道交汇处 Agent 数量激增,获得最短等待时间和最短疏散过程,为应急救援方案的制定提供技术支持。

### 参考文献:

- [1] VERMUYTEN H, BELIËN J, BOECK L D, et al. A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems[J]. Safety Science 2016 87: 167-178.
- [2] LOVREGGIO R, RONCHI E, NILSSON D. Calibrating floor field cellular automaton models for pedestrian dynamics by using likelihood function optimization[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications 2015 438: 308-320.
- [3] 高凤强, 颜逾越, 许策, 等. 一种考虑引导作用的行人疏散元胞自动机模型[J]. 交通运输系统工程与信息 2016, 16(6): 60-66.
- [4] YOU Lei, ZHANG Chi, HU Jun, et al. A three-dimensional cellular automata evacuation model with dynamic variation of the exit width[J]. Journal of Applied Physics 2014, 115(22): 224905-224905-10.
- [5] 刘一, 沙云飞, 范卫东. 基于势能场的机场行人行为建模仿真研究[J]. 计算机仿真 2011 28(3): 119-121.
- [6] 张开冉, 杨树鹏, 何琳希, 等. 基于社会力模型的车站负人群疏散模拟研究[J]. 中国安全科学学报 2017 27(1): 30-35.
- [7] 李楠, 王金环, 汪洋, 等. 事故中多出口场馆人员小团体行为疏散研究[J]. 计算机仿真 2017 34(6): 402-406.
- [8] TOSO M A, GOMES H M, BRITO J L V D. Crowd-structure interaction: investigating the spatiality and synchronization of a pedestrian force model[J]. Journal of Constructional Steel Research 2017 133: 510-521.
- [9] 张学锋, 张成俊, 白晨曦, 等. 基于智能体技术的多重灾难人员疏散感知模型[J]. 系统仿真学报 2016 28(3): 534-542.
- [10] 褚龙现, 刘高原. 基于 Agent 的应急疏散模型研究[J]. 计算机技术与发展 2011 21(9): 201-203.
- [11] 吴智威, 刘东峰, 程昱, 等. 基于智能体方法的人群疏散三维仿真[J]. 计算机技术与发展 2012 22(11): 108-112.
- [12] 姜雷. A\* 算法在矿井灾害应急救援中的应用[J]. 煤炭技术 2011 30(5): 109-111.
- [13] GUILD E M, LIKE E C, GUSTAFSON S C. Fast cardinal interpolation[J]. Open Cybernetics & Systemics Journal 2010, 4(1): 1-5.

## 《计算机技术与发展》投稿要求

1. 文稿具有创新性,内容科学可信,结构严谨,图表清晰,文稿必须使用 word 排版,应在 4 页以上(A4 纸,Word03 默认页面,5 号宋体,包括图表在内),文稿包括:题名(20 字以内),作者姓名,作者单位(包含地区名和邮编),摘要(须达到 300 汉字以上,包括:目的、方法、结果、结论,英译文同步、准确),关键词(4~8 个),中图分类号,正文,参考文献(总数应在 15 篇以上,外文文献不少于 5 篇),与中文对照的英文(包括:题名、作者姓名、作者单位、摘要、关键词)。提供所有作者的简介:姓名、性别、出生年、学位(职称)、研究方向。

2. 文中的图表要符合国家规范,一般不应超过 6 个,图形尽量用 visio 处理,版面要清晰、紧凑、美观,图中文字采用六号宋体或 Times New Roman,打印清晰,不用彩色,坐标图中要注计量单位、符号,表格一律采用三线表(不画竖线)。

3. 文中所有物理量和单位应符合国家标准或国际标准,外文字母、单位、符号的大小写、正斜体、上下角标及易混字母应标注清楚,标量用白斜体字母(可以加下标)表示,矢量、矩阵和张量用黑斜体字母(可以加下标)表示。数学公式必须用数学编辑器处理。

4. 文稿章节编号采用三级标题:一级如 1, 2, 3, …; 二级如 1.1, 1.2, 1.3, …; 三级如 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, …。

5. 参考文献尽量选用近几年计算机专业期刊论文,未公开发表的资料请勿引用。参考文献序号按文中引用顺序排列。