

3-22-2023

Floor Evacuation Simulation Based on BIM and MR

Zhijie Li

1.College of Information and Control Engineering, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi' an 710055, China;, lizhijie@xauat.edu.cn

Shuangyu Ma

1.College of Information and Control Engineering, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi' an 710055, China;, raven.marshall@xauat.edu.cn

Changhua Li

1.College of Information and Control Engineering, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi' an 710055, China;

Xiao Liang

2.Academy of Art, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi' an 710055, 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.

Floor Evacuation Simulation Based on BIM and MR

Abstract

Abstract: Facing with the problem that the floor evacuation simulation only annotates the floor plan route, which is relatively single and not intuitive, a 3D building evacuation simulation method integrating mixed reality and building information model is proposed. *The BIM components are reasonably planned and segmented, and reasonable annotation is performed. The BIM information is routed through the surface area heuristic optimization algorithm based on the bounding volume hierarchy. The evacuation simulation process is imported into the Microsoft HoloLens2 hardware platform using the Unity3D development engine.* The experimental results show that, compared with the previous evacuation simulation expressed only by the building plan, by introducing MR equipment as a source of multi-source perception providing device, the evacuation simulation is extended to the interactive real three-dimensional space, which can make the evacuation guidance process more intuitive, the simulation guidance efficiency is higher and the experience is stronger.

Keywords

BIM(building information modeling), MR(mixed reality), evacuation simulation, SAH(surface area heuristic), human-computer interaction

Authors

Zhijie Li, Shuangyu Ma, Changhua Li, Xiao Liang, and Jie Zhang

Recommended Citation

Zhijie Li, Shuangyu Ma, Changhua Li, Xiao Liang, Jie Zhang. Floor Evacuation Simulation Based on BIM and MR[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 658-669.

基于 BIM 与 MR 的楼层疏散仿真

李智杰¹, 马爽予^{1*}, 李昌华¹, 梁霄², 张颀¹

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 艺术学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对目前楼层疏散仿真仅将楼层平面图进行路线标注, 相对单一且不直观的问题, 提出融合混合现实(mixed reality, MR)与建筑信息模型(building information modeling, BIM)的三维建筑的疏散仿真方法。规划分割BIM各构件并进行标注, 将BIM信息经过基于层次包围盒的表面积启发式优化算法进行路径规划, 借助开发引擎Unity3D将疏散仿真流程导入Microsoft Hololens2硬件平台。实验结果表明, 相较于以往仅通过建筑平面图表达的疏散仿真, 通过引入MR设备作为多源感知来源, 将疏散仿真扩展到可交互的现实三维空间, 能够使疏散引导过程更直观, 仿真引导效率更高, 体验性更强。

关键词: 建筑信息模型; 混合现实; 疏散仿真; 表面积启发; 人机交互

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)03-0658-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1266

引用格式: 李智杰, 马爽予, 李昌华, 等. 基于BIM与MR的楼层疏散仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 658-669.

Reference format: Li Zhijie, Ma Shuangyu, Li Changhua, et al. Floor Evacuation Simulation Based on BIM and MR[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 658-669.

Floor Evacuation Simulation Based on BIM and MR

Li Zhijie¹, Ma Shuangyu^{1*}, Li Changhua¹, Liang Xiao², Zhang Jie¹

(1. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Academy of Art, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Facing with the problem that the floor evacuation simulation only annotates the floor plan route, which is relatively single and not intuitive, a 3D building evacuation simulation method integrating mixed reality and building information model is proposed. The BIM components are reasonably planned and segmented, and reasonable annotation is performed. The BIM information is routed through the surface area heuristic optimization algorithm based on the bounding volume hierarchy. The evacuation simulation process is imported into the Microsoft Hololens2 hardware platform using the Unity3D development engine. The experimental results show that, compared with the previous evacuation simulation expressed only by the building plan, by introducing MR equipment as a source of multi-source perception providing device, the evacuation simulation is extended to the interactive real three-dimensional space, which can make the evacuation guidance process more intuitive, the simulation guidance efficiency is higher and the experience is stronger.

Keywords: BIM(building information modeling); MR(mixed reality); evacuation simulation; SAH (surface area heuristic); human-computer interaction

收稿日期: 2021-12-10 修回日期: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61373112, 51878536); 陕西省自然科学基金(2020JQ-687); 陕西省住房城乡建设科技计划(2020-K09)

第一作者: 李智杰(1980-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为数字建筑、图形图像处理。E-mail: lizhijie@xauat.edu.cn

通讯作者: 马爽予(1995-), 男, 满族, 硕士生, 研究方向为数字建筑与扩展现实技术。E-mail: raven.marshall@xauat.edu.cn

0 引言

建筑内人员紧急疏散作为重要的建筑安全问题, 学界对此开展的研究主要包括各种疏散方法、疏散模拟等, 相应疏散算法及其优化变种也层出不穷。但囿于目前国内外疏散仿真演示大部分依赖二维图纸, 令缺乏建筑行业基本识图常识的用户无法清晰理解疏散全过程以及注意事项, 进而导致疏散速度慢, 甚至造成严重的人员及财产损失。而疏散仿真受到人员成本、过程中安全保障及受试者个体接受能力差异等问题的牵制, 导致仿真收效甚微。因此, 寻求相较于二维图纸更直观的建筑内疏散仿真成为研究热点。

Eastman C M于1974年^[1]提出的建筑信息模型(building information modeling, BIM)是一种将建筑信息载体从二维平拓展至三维空间的建筑信息表达方式, 近年来在设计 and 施工阶段发展迅速^[2]。Milgram在1994年^[3]提出混合现实作为较新颖的显示技术, 旨在将虚拟数字模型叠加在现实物体之上。将BIM建筑模型导入混合现实平台, 可以有机结合成为更直观、更精确的方式向受众展示建筑细节, 让建筑具体构造呈现给疏散受众, 产生物理空间上的直观感受, 从而更容易理解后续疏散仿真引导路线及其在现实中的物理特征。如今结合BIM与扩展现实(extended reality, XR)为一体的仿真多为BIM在虚拟现实(virtual reality, VR)中的运用, 如文献[4]在建筑施工阶段结合BIM与XR以提升施工效率与质量, 文献[5]利用VR结合BIM进行车站疏散相关研究。因为并未在真实物理环境中与模型进行交互, 存在一些疏散过程与现实交互不足等问题。将BIM与MR(mixed reality)结合具有高交互性, 可将虚拟与现实紧密结合, 因此有望取得更好的效果。

本研究旨在融合BIM和MR技术, 将建筑物模型叠加经过疏散优化算法规划的路径, 而后实时动态显示在MR设备上, 为疏散仿真或者进一步为实时疏散指引提供一种更加直观展示^[6]。对比传统疏散仿真, 其优点在于既可以将建筑以三

维可交互的状态呈现在受众面前, 令建筑模型更加真实地融合于物理世界; 又可以减少利用疏散引导仿真时长, 以实际仿真受众模型的运动和语音提示让疏散路线更易被理解。其中关键点在于利用BIM和MR的有机结合, 整合BIM作为建筑模型平台的精细、直观和易管理的特性, 辅以混合现实作为新一代显示技术, 将现实和虚拟紧密连接起来的优势^[7], 结合优化疏散算法的合理高效规划, 验证新型疏散仿真对比传统方式在速度和效果上具有的优越性。

基于对疏散过程仿真流程与传统疏散引导不直观, 仅通过建筑平面图来对疏散路线进行大致了解这一问题, 本文将提出新的疏散仿真演示方案。虽然三维建模软件的发展将BIM通过屏幕呈现给疏散受众能够增强对疏散路线的理解, 但是对于部分空间感不强烈的受众, 从二维屏幕理解三维空间依然比较抽象。因此利用混合现实将疏散路径叠加于现实环境中, 通过混合现实环境中与建筑模型直接“物理接触”来详细了解并感受疏散过程, 可令被疏散人群在更深刻、更容易理解的情况下与真实建筑环境记忆进行叠加, 从而实现疏散仿真从二维平面扩展到三维空间。

1 建筑模型室内导航设计

本文技术路线如图1所示。

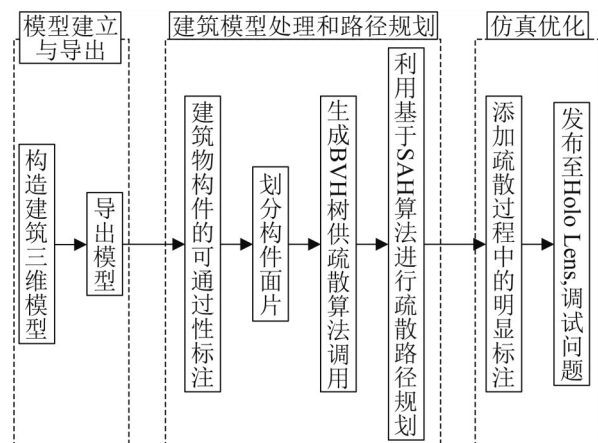


图1 技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap

本文导航部分总体分以下几步：首先标注建筑物各构件的可通过性。建筑物导出时以族为层级关系整合至 FBX 文件，可以将各构件根据疏散导航要求，设置通过性阈值为后续路径规划提供通过代价，用来计算路径通过不同位置和构件时耗费的时间和距离，进行最优路径规划。其次是利用基于层次包围盒(bounding volume hierarchy, BVH)的表面积启发(surface area heuristic, SAH)算法，通过计算面片集合与起止点间的交叉点来进行疏散路径的规划与优化，通过对面片集合建立 BVH 树，进而利用表面积启发算法优化 BVH 树，达到减小交错面积进而优化导航路径的目的。最后通过对疏散路线沿途消防设备与狭窄通过区域进行标注进一步提升疏散效率。

1.1 室内导航问题分析

通过对 BIM+MR 有机结合下面向楼层动态个体快速疏散问题进行研究后得出，在单一楼层疏散到特定位置时，针对个体疏散的重点在于将楼层可行走区域进行分割，并通过分析切割区域边界进行路径规划。因为起止点的确定，可通过两点间线段经过的可通过网格内部最近距离来进行规划。

对可行走区域进行分割的具体方法是利用轴向平行包围盒(axial align bounding box, AABB)包围模型内各个建筑构件，并对临近关系进行分析^[8]，判断构件包围盒是否与起止点间线段有交集。在全局坐标系下 AABB 盒构造根据坐标系 x, y, z 轴构建沿坐标轴方向能包围物体的最小外接长方体，设最小坐标为 $p_{\min}(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ ，最大坐标 $p_{\max}(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ ，则 AABB 盒可表示为

$$R = \{(x, y, z) | x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, z_{\min} \leq z \leq z_{\max}\} \quad (1)$$

公共建筑构件正常情况下一般是互相垂直且形状规则(多数为长方体)，因此利用 AABB 盒作为碰撞检测手段相较于其他包围结构可节省内存，并有效减少不必要的参数，易得到最优解，从而

最终提高路径规划效率。

三维模型由若干点连接成面片组成外表面，因此可根据建筑结构和构件 AABB 盒的包含关系建立树形结构^[9]。主要思路是利用与起止点连线有交集的面片集合将楼层整体划分成路径区和非路径区，即通过划分构件包围体并组织成树形结构^[10]。既能够剔除掉不在路径上的区块，减少旁支路径长度判断次数，还可以利用树形结构梳理节点间的关系^[11]，方便后续疏散路径规划。

传统的碰撞检测由 Weghorst 于 1984 年^[12]提出，而碰撞检测代价一般采用的是 Gottschalk^[13]提出的方法，常用于评判不同路径间优劣，即

$$T = N_v C_v + N_p C_p + N_u C_u + C_d \quad (2)$$

式中： T 为两包围盒间碰撞检测代价； N_v 为路径上包围盒碰撞检测总次数； C_v 为两包围盒间单次碰撞检测代价； N_p 为构件间碰撞检测总次数， C_p 为两构件间单次碰撞检测代价； N_u 为终点变更之后 BVH 树更新节点数目； C_u 为更新单一节点代价； C_d 为多次导航规划时间消耗，本文中为 0。易得：在刚性建筑构件位置固定的前提下，减小 T 的方法是构造紧密且合理的层次包围盒，减小 N_v 和 N_p ，通过使用更优秀的碰撞检测算法减小 C_v 和 C_p 。

综合上述导航规划要点可得本文的室内疏散仿真的路径规划算法如下^[14]：

step 1: 计算各个建筑物构件图元 AABB 包围盒、质心(一般情况下选取包围盒的中心)，将这两组数据分别存储到对应数据库中。

step 2: 将所有面片集合作为根节点，选择恰当的划分点将所有面片分为左右两棵子树，后续计算采用式(1)计算代价。因随机两点组成线段经过面片包围盒概率相近，为保持树尽量成为完全二叉树以减少层数，进而减少总体运算代价，分割节点时尽量将树的两分支内节点数目总数保持一致，分割方式如图 2 所示。

step 3: 分割整体包围盒，将面片集合分割存于新包围盒中，不能出现不同包围盒存储在同一

面片的情况, 最终每组被分割的面片被包含于唯一的新包围盒叶子节点。即对于当前区域, 创建两个分支节点, 并生成2个包含区域内所有面片同时相交为空集的包围盒^[15]。

(1) 若当前区域内面片数量已超过允许包含数量, 表明到达递归边界, 形成叶子节点, 通常叶子节点包含不超过5个面片。

(2) 将所有面片重心坐标按 x 轴坐标排序后, 作一条垂直于 x 轴的分割线, 使得分割线两侧区域内的面片总数相等, 继续递归处理两个区域。

step 4: 利用BVH算法遍历所有包围盒是否被起止线段穿过, 将信息保存至相应数组, 将完全二叉树转为链表, 方便后续查找节点信息。

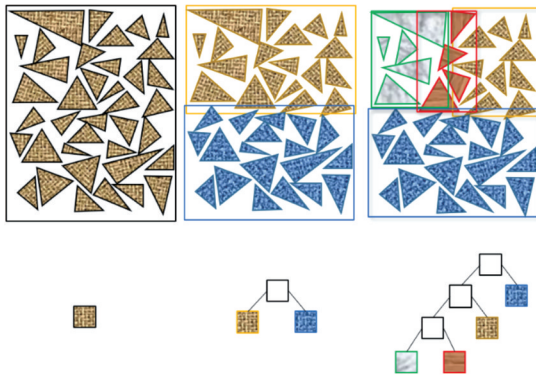


图2 面片划分子节点的过程
Fig. 2 Process of patch dividing subnodes

1.2 优化构造包围盒

将建筑模型进行分区来构造包围盒的难点在于三维建筑构件模型内狭小空间的精细分割较为复杂。因为建筑构件分层与构件间交错较多, 导致打断建筑构件连接的计算较为复杂, 即包围盒之间发生重叠导致导航区域交错, 进而影响路径生成。

因此, 需要利用表面积启发式算法^[16]进行优化。为方便表达, 将左子树称为L, 右子树称为R, 划分左右子树内面片总数分别为 n 和 m , 并且其各自进行通过性测试的时间复杂度为 $t_{ist}(x)$, 可得总时间成本为 $\sum_{i=1}^n t_{L_ist}(i)$ 和 $\sum_{j=1}^m t_{R_ist}(j)$, 为方便计

算, 设 $t_{ist}(i)=1$; 根据L、R子树覆盖面积 S_L 和 S_R 设定L和R通过概率为 P_L 和 P_R , 其计算公式为 $P_{(L|R)} = S_L/S_R$, 另外设定 $C_{ist}=0.125$ 作为遍历全树节点的成本。最终综上可得总体时间代价为

$$C(L, R) = P_L \sum_{i=1}^n t_{L_ist}(i) + P_R \sum_{j=1}^m t_{R_ist}(j) + C_{ist} \quad (3)$$

采用SAH旨在考虑面片分布, 将子节点包围体重叠程度作为运算代价, 避免重叠区域多次进入规划路线而导致的时间浪费。

1.3 被疏散人员移动速度

为了更贴近实际, 采用Predetchenky^[5]提出的行人紧急疏散运动速度模型, 其计算公式为

$$\bar{v} = m \left[\frac{112D^4 - 380D^3 + 434D^2 - 217D + 57}{60} \right] \quad (4)$$

$$\bar{v}_e = u_e \cdot \bar{v} \quad (5)$$

式中: \bar{v} 为正常行人移动速度; \bar{v}_e 为仿真所求个体疏散速度, 通常来讲 $\bar{v} \leq \bar{v}_e$; D 为疏散人群特征算子, 定义为

$$D = \frac{\sum N_i \cdot P_i}{A} \quad (6)$$

式中: N_i 为疏散人群中不同类别人群总人数, 本文实验Agent总数在初始情况下设为20; P_i 为每类疏散人群的占地面积; A 为区域可行走总面积, 本文采用的可行走面积为 250 m^2 ; m 和 u_e 为根据建筑分区划定的速度增益, 因本仿真为单层疏散, 二者各自参数设为 $m=1$, $u_e=1.49-0.36D$ 。

首先根据文献[17-18]中疏散速度、人群占地面积等可得出人群中不同类型疏散对象相关数据, 如表1所示。

表1 不同人群模型半径、占比分布和行走速度
Table 1 Radius, proportion distribution and walking speed of different types of manikins

人群分类	模型半径 $R/$	占比分布/ $$	行走速度 $v_{di}/$
	m	%	(m/s)
男性中青年	0.27	40	1.35
女性中青年	0.24	40	1.15
年长	0.25	15	0.80
年幼	0.21	5	0.90

其次计算不同类别疏散对象的紧急疏散速度 v_{ei} , 根据式(4)~(6)求得 $\bar{v}=0.89$, $\bar{v}_e=1.32$ 。而后将各类人群期望速度平均值 \bar{v}_d 代入其对应的紧急疏散速度 v_{ei} 的计算公式, 如式(8)所示, 以得出最终疏散速度。

$$\bar{v}_d = \frac{\sum N_i \cdot v_{di}}{\sum N_i} \tag{7}$$

$$v_{ei} = \frac{v_{di}}{\bar{v}_d} \cdot \bar{v}_e \tag{8}$$

最后可得出不同类别疏散对象紧急疏散速度如表2所示。

表2 不同类别对象紧急疏散速度

Table 2 Emergency evacuation speed of different objects

m/s	
人群分类	紧急疏散速度 v_{ei}
男性中青年	1.03
女性中青年	0.87
年长	0.61
年幼	0.68

1.4 人员密度对疏散效果的影响

疏散速度受空间内人员密度影响较大, 密度越大, 疏散速度越慢。利用式(6)对 N_i 的定义, 设定在相同疏散面积(即 250 m^2)下在初始情况的基础上增加 Agent 数量, 面向 20 人、60 人和 100 人进行对比验证如表3所示。

表3 不同人群密度应急疏散速度

Table 3 Trend of emergency evacuation speed at different densities

人群分类	m/s		
	20人	60人	100人
男性中青年	1.51	1.29	1.10
女性中青年	1.29	1.10	0.94
年长	0.90	0.76	0.65
年幼	1.01	0.86	0.73

不同疏散密度下的疏散速度趋势如图3所示。由图3可以看出, 在人员密度较大时, 疏散速度会有下降的趋势。因此仿真程序考虑对狭窄通过区域(门、狭窄通道等宽度限制区域)提前高亮, 提示有序通过狭窄区域来进行疏散指导。

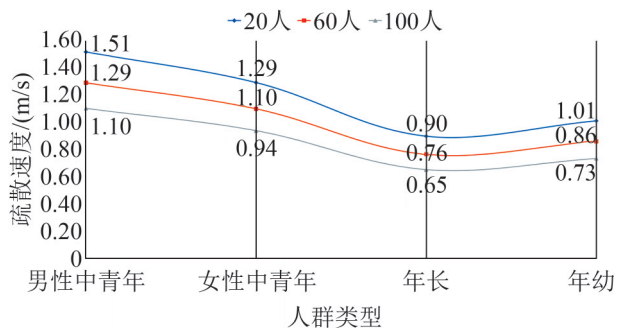


图3 不同密度应急疏散速度趋势图

Fig. 3 Emergency evacuation speed trend at different densities

1.5 MR与传统疏散仿真效果预测对比

根据MR疏散仿真更真实且易被理解的特点, 表明在疏散仿真效率和效果上, 基于BIM+MR的疏散仿真可以得到比传统二维疏散仿真更优异的效果^[19]。因此可以根据传统疏散仿真时间与BIM+MR疏散仿真时间进行对比归纳, 得出时间拟合公式。未来可根据传统疏散仿真时间来对BIM+MR疏散时间进行初期估算。本实验基于BIM对三维虚拟模型投射于现实环境, 并进行充分人机交互增强理解这一功能进行探讨。其主要对比对象是以往基于传统二维CAD建筑图纸并结合人工讲解的疏散方案, 因此可以将疏散速度设为两档, 一种为1.4节中描述的确切疏散速度 v_{ei} , 另一种为保证志愿者能理解疏散路径与注意事项的 v_{ei} 多倍速。为节约验证时间, 在Unity仿真中采取的是二倍速, 因此呈现出的实验结果为超实时的。为控制变量以保证两方案仅为疏散展示方案上的不同, 将上文疏散路径的规划方法同时作用于传统疏散演示方案与BIM+MR演示方案。根据对三种不同类型的单层建筑实验得出对不同种类单层建筑的疏散时间对比如表4所示。

表4 疏散仿真耗时

Table 4 Time consumption of evacuation simulation s

建筑	BIM+MR	传统
A	15	50
B	33	59
C	51	119

根据表4得出的小规模实验数据拟合二阶公式为

$$y_{id} = 0.0787x^2 - 3.278x + 81.46 \quad (9)$$

式中: y_{id} 为通过传统疏散仿真理解疏散路径总时长; x 为通过BIM+MR疏散仿真理解疏散路径总时长。

2 整合仿真至混合现实硬件

将疏散仿真整合至Hololens2需要将BIM信息提取处理后无损导入开发环境。因此要对建筑模型信息进行处理, 流程如图4所示。

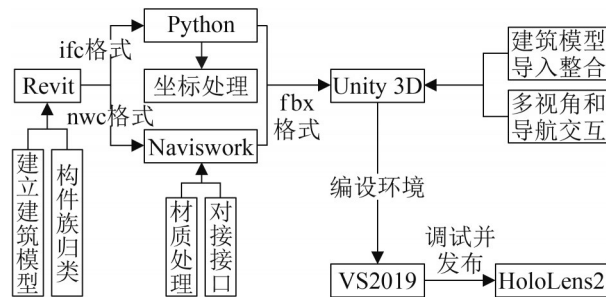


图4 模型数据处理流程

Fig. 4 Model data processing flow

2.1 Hololens2开发平台

常用的3D引擎如Unity3D、Unreal Engine皆对Hololens2的开发有较为完善的适配, 需要综合考虑后续开发过程中的多种需求来选取三维引擎开发平台。面向Hololens2仿真开发, 首先受制于其处理能力(高通骁龙850)局限, 三维开发引擎需对移动端优化。其次三维建筑模型各构件在Revit软件中以构件族的形式进行分类管理, 利用族类型作为建筑模型构件管理方式易查找。为简化后续开发, 需要将族关系转化为层级关系。最后, 经过考察得出Unity3D和Revit间数据交互较完善。综上, 选择Unity3D作为模型处理平台^[20]。开发疏散仿真首先要利用Unity3D中设计功能模块, 实现模型和动态疏散路径在Hololens2中的展示。

2.2 建筑数字模型的搭建

本文采用Revit平台, 将建筑模型按功能导出

为不同类别的文件, 方便后续处理。采用单层建筑(A建筑)作为实验对象, 实际建筑模型和测试疏散算法的二维投影平面图如图5所示。

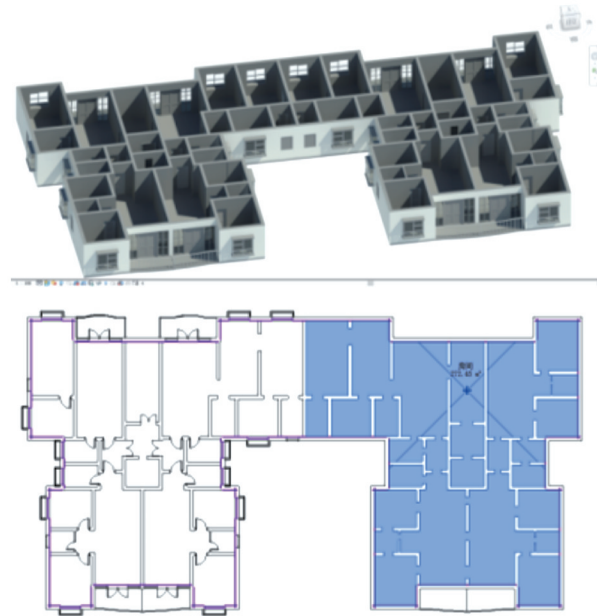


图5 建筑模型立体图(上)和平面图(下)

Fig. 5 Stereoscopic view (top) and plan of building model (bottom)

模型导出时先用Revit导出fbx格式, 构件会根据其族类型进行分类, 令调节可通过性参数的过程可以更加精确且效率更高。同时调用Revit接口, 通过二次开发提取出建筑构件的GUID (graphical unique identifier), 匹配相应建筑模型构件, 使得后续开发管理更规范。

2.3 建筑数字模型的导出

为面向一般受众, 需要显示建筑的真实材质以达到接近实物效果, 从而令疏散展示效果更清晰且容易被志愿者理解。基于BIM的建筑模型文件处理流程如图6所示。

将建筑模型数据导出为nwc格式和ifc格式。nwc文件经Navisworks软件转换为导入建筑真实贴图的fbx文件, ifc文件作为面片节点信息来源, BIM原模型与Unity3D导入建筑模型对比如图7所示。

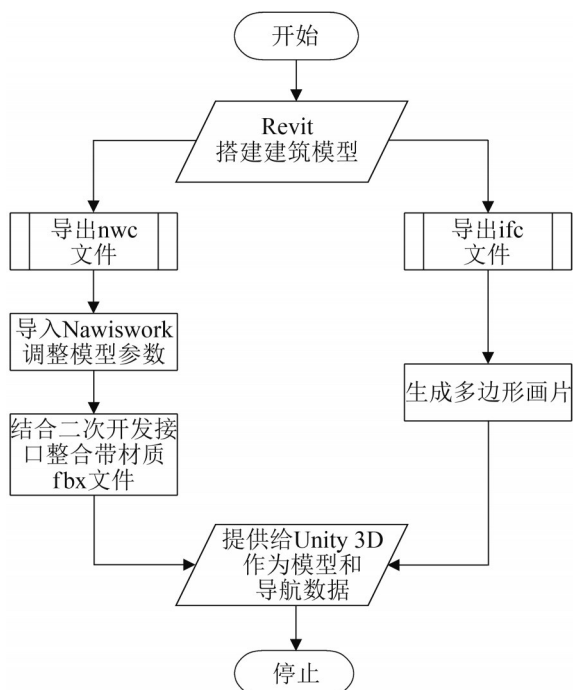


图 6 BIM 信息导出流程图
Fig. 6 BIM Information export flowchart

适配导航程序中的基于包围盒可通过性的路径规划；②建筑物自身贴图需要与建筑在 BIM 中的贴图基本一致，方便后续疏散演示时被疏散人员理解。未贴图建筑与真实贴图建筑对比如图 8 所示。

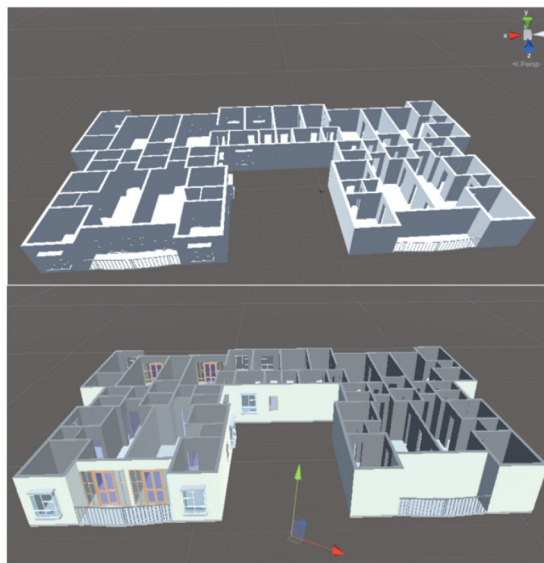


图 8 未贴图建筑(上)和真实贴图建筑(下)对比
Fig. 8 Comparison between unmapped building (top) and real mapped building (bottom)

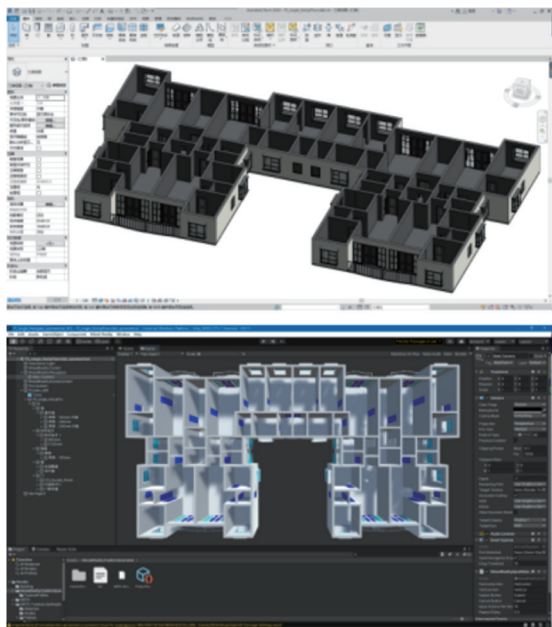


图 7 Revit 中原始模型(上)和导入 Unity3D 后(下)
Fig. 7 Original model in Revit (top) and after importing Unity3D (bottom)

2.4 建筑数字模型的导入

将建筑物模型导入 Hololens2 需要解决 2 个问题：①建筑物各个构件需要作为单体元素，用以

BIM 软件建模较真实且建筑信息详细，仿真要求在 Unity 中应采用相同材质和透光性的构件，因此在模型导入阶段需要利用 shader 对不合规构件进行属性优化设定与材质处理。利用 OpenGL (openGL shading language) 结合 GLSL 改进材质特性，达到尽可能接近真实材质的构件外表和性质。

随着混合现实市场的完善，不同 MR 设备数据的交互也成为需要考虑的问题。对此，OpenXR 作为国内外混合现实的统一标准协议框架，需要将其作为开发必要选项植入。同时，Microsoft Hololens2 作为微软推出的混合现实设备，其研发的混合现实工具(mixed reality toolkit, MRTK)也是开发工具之一，结合 OpenXR 与 MRTK，为通过 Unity 开发 Hololens2 仿真提供了基本底层架构，令仿真开发更加高效便捷。最后，在 VS2019 平台下进行疏散算法开发^[21]。

上述框架和开发工具导入完成后可以将 2.3 节

中导出的建筑模型放入项目场景并生成项目文件, 获取模型的GUID供后续开发。同时将三维建筑物模型置于合适位置, 调整大小并整合建筑构件的可通过性参数, 供后续疏散算法计算路径通过代价。

2.5 导航网格及导航算法应用

环境配置完成后, 需要利用VS2019开发疏散程序, 根据2.4章中标记构件可通过性参数及面片节点信息计算出疏散导航网格, 整合网格数据并显示在Unity模型中。

完成上述处理后可将前文提到的疏散算法用于动态导航模型(NaviAgent), 设定起止点间疏散导航, 引导NaviAgent移动。消防栓模型摆放于各房间中, 在NaviAgent通过其附近时根据视野范围设定来切换红色以达到显著提示目的。

2.6 Hololens2平台测试与改进

疏散算法引导NaviAgent完成动态引导并利用Unity软件仿真调试成功后, 将VS2019编译状态转换为发布, 同时PC连接Hololens2进行联机调试, 安装疏散仿真程序以脱机使用。在确认将Hololens2连接计算机并识别后进入调试状态。预加载完成后, 在Unity中调试完成的内容将会显示在视野内, 此时Hololens2会根据疏散算法显示疏散网格并实时跟踪疏散目标, 实现疏散仿真引导。

3 整体测试与结果分析

经过SAH优化的路径规划算法可有效解决因包围盒相邻关系较复杂而导致的重复经过同区域或路径迂回问题, 如图9所示。

当测试BIM+MR疏散方案时, 先为志愿者佩戴设备, 将Hololens2应用菜单中的仿真场景打开, 然后根据提示进行疏散演示, 界面如图10所示。

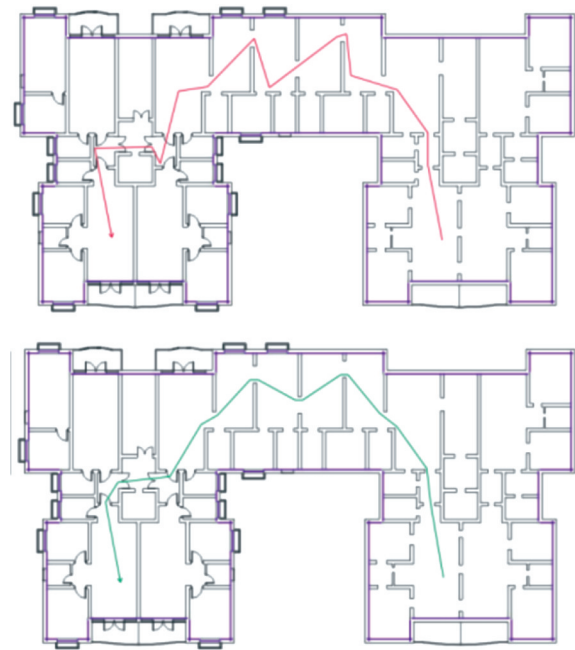


图9 优化前(上)和优化后(下)对比

Fig. 9 Comparison between before optimization (top) and after optimization (bottom)

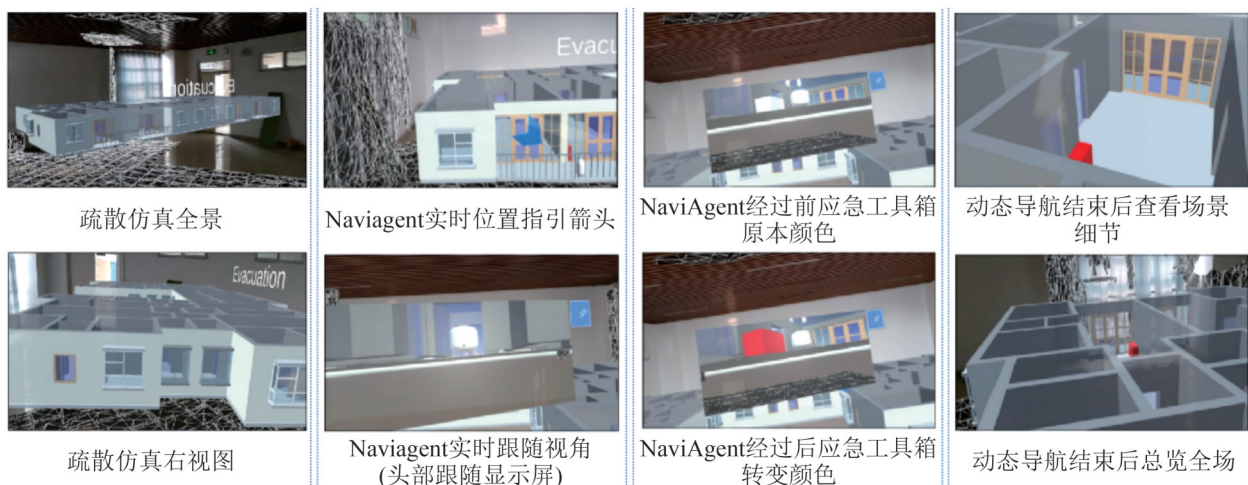


图10 MR疏散仿真

Fig. 10 MR evacuation simulation

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

• 665 •

NaviAgent 将根据疏散算法向终点坐标进行运动，蓝色箭头跟踪指示实时位置。同时 NaviAgent 身后跟随相机画面也会同时显示于左前上方头部跟随框中，以获取动态第三视角。

路径中应急工具箱与狭窄区域位置转换红色以及对话框标注可帮助受试者了解疏散路径中的细节信息。疏散过程通过语音进行引导，让受试者可以更清晰的了解疏散流程与注意事项。在全部演示完成后，受试者也可以与模型进行交互，查看房间结构以及缩放模型进而对疏散环境有更清晰的认知和理解。

传统疏散方案允许志愿者在 Unity 中以模型整体几何中心为原点，从 z 轴向负方向观察，即以建筑模型的俯视图来观察疏散仿真的动态流程。同时通过口述的方式向志愿者讲解疏散路径环境的细节以及注意事项，其中口述讲解的重点在提醒疏散路径中的狭窄区域与消防设备的位置，传统疏散仿真起止状态如图 11 所示。

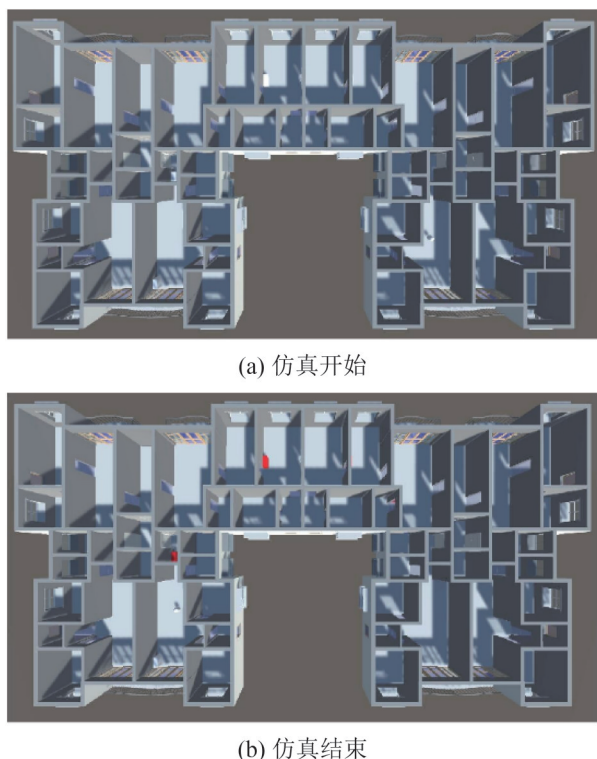


图 11 传统疏散仿真
Fig. 11 Traditional evacuation simulation

将图 9 得出的优化路径和表 3 得出的疏散速度代入混合现实疏散仿真模型，可得疏散引导动态流程时间为 9.85 s，志愿者通过传统疏散方案与 BIM+ MR 疏散方案理解疏散过程的时间对比见图 12。

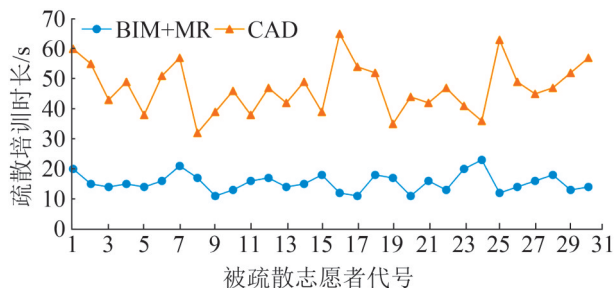


图 12 疏散时间对比图
Fig. 12 Comparison of evacuation time

将此数据进行二阶拟合得出公式为

$$y_{exp} = 0.08207x^2 - 3.256x + 77.12 \quad (10)$$

式(10)与式(9)对比如图 13 所示，可以看出：BIM+MR 疏散展示方案更有利于理解疏散路径，在更短的时间内达到了较好的效果。

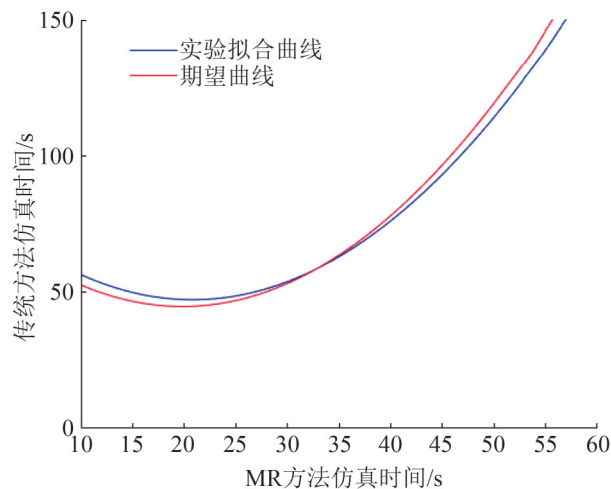


图 13 前期预测函数和仿真数据对比
Fig. 13 Comparison of preliminary prediction function and crowd simulation data fitting

除了使用疏散仿真时间评价疏散演示效果外，也采取了问卷调查的形式来评价疏散仿真主观感受。将直观与否划为 5 个等级，分别对应数字 1、2、3、4、5，结果如图 14 所示。可以看出，

BIM+MR 作为一种新兴的疏散仿真引导方式效果更佳。

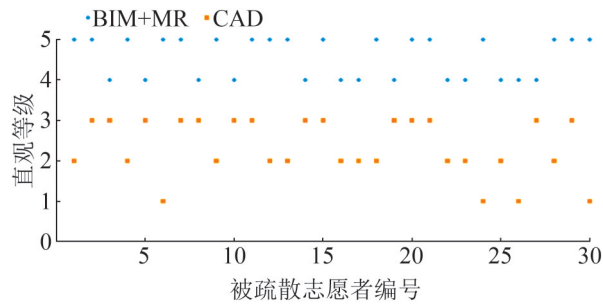


图 14 疏散过程直观等级
Fig. 14 Visual level of evacuation process

为检验疏散算法与仿真程序的普适性, 选择两种不同场景进行验证, J 型办公楼层(1 556.05 m²)和教学楼单层(282.60 m²)分别如图 15 所示, 其中 J 型办公楼层作为大型公共办公建筑单层疏散的代表(后文用 D 建筑指代), 教学楼作为较小面积单层疏散的代表(后文用 E 建筑指代)。对上述两种建筑进行可通过性标注以及路径规划后可得如图 16 所示的导航网格。

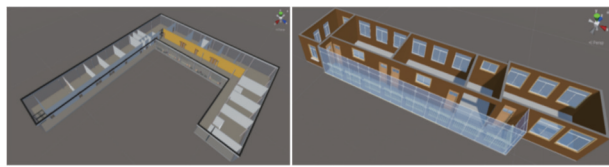


图 15 D 建筑(左)E 建筑(右)
Fig. 15 Construction D (left) construction E (right)

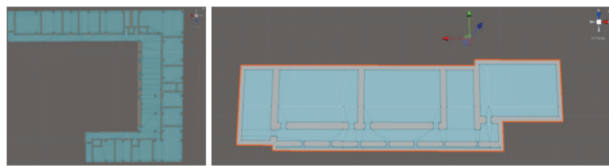
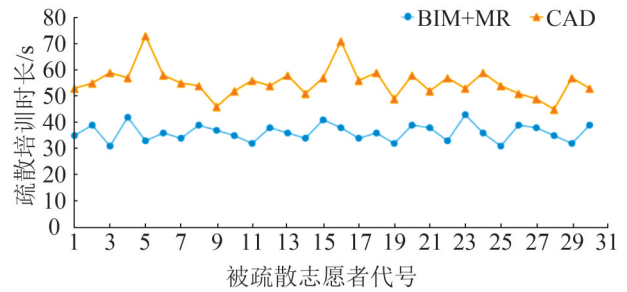
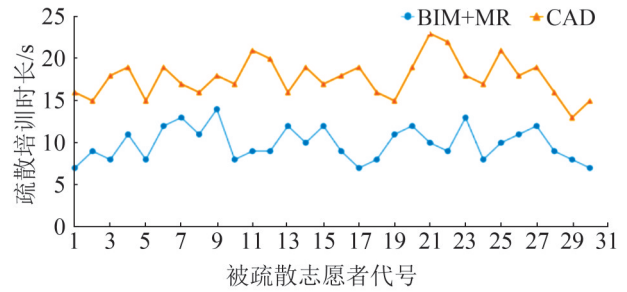


图 16 D 建筑(左)E 建筑(右)的导航网格
Fig. 16 Navigation grid: construction D(left) construction E (right)

同样对这两种建筑进行基于 BIM+MR 的动态疏散仿真引导, 其中 D 建筑导航过程为 26.33 s, E 建筑导航过程为 5.61 s, 疏散效果与仅采用传统疏散方案进行疏散引导的时间对比如图 17 所示。



(a) D 建筑



(b) E 建筑

图 17 建筑疏散时间对比
Fig. 17 Comparison of evacuation time of buildings

通过大中型办公建筑与小型教学楼来验证的单层疏散仿真, 经过导航网格分析和疏散效果对比后可知, 面对狭窄区域较多的建筑类型辅助疏散效果更佳, 而对于狭窄区域较少的建筑也有一定的辅助效果。综上所述, 本文方案适用于大多数建筑单层的疏散导航。

4 结论

利用 Unity 3D、Autodesk Revit 与 Microsoft Hololens2 所搭建的混合现实单层疏散仿真系统, 可以将基于 BIM+MR 的疏散过程直观地叠加显示在现实世界中。在疏散仿真中辅助受试者可直观感受三维疏散路径的任务, 并通过受试者与模型间交互这种更具体的操作流程来感受疏散的全过程, 实验表明本疏散仿真操作性良好, 具有简洁明了的交互界面, 可实现便捷的人机交互, 从而理解真实疏散的全过程。综上, 该系统在建筑疏散仿真中具有较大潜力, 使疏散引导易于交互、直观便捷, 更容易且更精准地辅助疏散。

同时, 在实验过程中, 对跨层疏散和大型建

筑整体疏散进行预研性实验时发现, 本文对应疏散算法对楼层之间连接区域存在一些不适配的问题。对此今后将会继续研究相关算法以寻求解决方案, 直至将疏散仿真过程扩展到建筑整体。

最后, 本文考虑的情况为基于理性状况下人群疏散的速度仿真, 是基于群聚中对单体行为的推断, 后期研究与实验会真实引入火灾疏散情况下的各种影响因子与不同规模的群体NaviAgent来进行人群疏散仿真, 进一步优化真实环境下的多人疏散仿真效果。

参考文献:

- [1] Song Y, Wang X, Tan Y, et al. Trends and Opportunities of BIM-GIS Integration in the Architecture, Engineering and Construction Industry: A Review from a Spatio-Temporal Statistical Perspective[J]. International Journal of Geo-Information (S2220-9964), 2017, 6(12): 397.
- [2] 李瑞杰. 基于混合现实的管网巡检系统的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所), 2020.
Li Ruijie. Design and Implementation of Pipe Network Inspection System Based on Mixed Reality[D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [3] Tamalee Basu, Olga Bannova, Jorge D Camba. Mixed Reality Architecture in Space Habitats[J]. Acta Astronautica (S0094-5765), 2021, 178(152): 548-555.
- [4] 夏中天. BIM+VR/AR/MR在施工阶段的应用[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(19): 83-84.
Xia Zhongtian. Application of BIM + VR/AR/MR in the Construction Phase[J]. Construction Technology Development, 2019, 46 (19): 83-84.
- [5] 白寒, 杨帅, 冯旭杰, 等. 基于BIM-VR的轨道交通车站客流疏散仿真研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(5): 60-65.
Bai Han, Yang Shuai, Feng Xujia, et al. Simulation on Passenger Evacuation of Rail Transit Station Based on BIM-VR[J]. Urban Fast Rail Transit, 2021, 34(5): 60-65.
- [6] Alizadehsalehi S, Hadavi A, Huang J. From BIM to Extended Reality in AEC Industry[J]. Automation in Construction, (S0926-5805), 2020, 116: 1-13.
- [7] 初毅, 邵兆通, 武涛. 基于MR+BIM技术的信息化建筑工程应用探讨[J]. 土木建筑工程信息技术, 2017, 9(5): 94-97.
Chu Yi, Shao Zhaotong, Wu Tao. Application of Information Building Engineering Based on MR + BIM Technology[J]. Civil Construction Engineering Information Technology, 2017, 9(5): 94-97.
- [8] 马登武, 叶文, 李瑛. 基于包围盒的碰撞检测算法综述[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 1058-1061, 1064.
Ma Dengwu, Ye Wen, Li Ying. Review of Collision Detection Algorithms Based on Surround Boxes[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 1058-1061, 1064.
- [9] 于瑞云, 赵金龙, 余龙, 等. 结合轴对齐包围盒和空间划分的碰撞检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(12): 1925-1937.
Yu Ruiyun, Zhao Jinlong, Yu Long, et al. Collision Detection Algorithm Combining Axis Alignment Surround Boxes and Spatial Partition[J]. Chinese Image Graphic, 2018, 23 (12): 1925-1937.
- [10] 孙敬荣, 卢新明. 基于混合包围盒与三角形相交的碰撞检测优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(19): 198-203.
Sun Jingrong, Lu Xinming. Colcollision Detection Optimization Algorithm Based on the Intersection of the Mixed Surround Box and the Triangle[J]. Computer Engineering and Application, 2018, 54(19): 198-203.
- [11] 李玉虎, 王宗彦. 基于混合层次包围盒碰撞算法的改进[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 112-118.
Li Yuhu, Wang Zongyan. Improvements Based on the Hybrid Hierarchical Surround Box Collision Algorithm [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36 (6): 112-118.
- [12] Weghorst H, Hooper G, Greenberg D P. Improved Computational Methods for Ray Tracing[J]. ACM Transaction on Computer Graphics, 1984, 3(1): 52-69.
- [13] Gottschalk S, Lin M, Manocha D. OBB Tree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection [C]// The 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans, LA, USA: ACM, 1996: 171-180.
- [14] 李玉虎, 王宗彦. 基于混合层次包围盒碰撞算法的改进[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(6): 112-118.
Li Yuhu, Wang Zongyan. Improvements Based on the Hybrid Hierarchical Surround Box Collision Algorithm [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36 (6): 112-118.
- [15] 杨帆. 基于B+树存储的AABB包围盒碰撞检测算法[J]. 计算机科学, 2021, 48(增1): 331-333, 348.
Yang Fan. AABB Surround Box Collision Detection Algorithm Based on B+Tree Storage[J]. Computer Science, 2021, 48(S1): 331-333, 348.

- [16] Wodniok D, Goesele M. Construction of Bounding Volume Hierarchies with SAH Cost Approximation on Temporary Subtrees[J]. *Computers & Graphics* (S0097-8493), 2016, 62(2): 41-52.
- [17] Yang X, Dong H, Yao X. Passenger Distribution Modelling at the Subway Platform Based on Ant Colony Optimization Algorithm[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory* (S1569-190X), 2017, 77: 228-244.
- [18] Shi J, Ren A, Chi C. Agent-Based Evacuation Model of Large Public Buildings under Fire Conditions[J]. *Automation in Construction* (S0926-5805), 2009, 18(3): 338-347.
- [19] 伍朝辉, 符志强, 王亮, 等. 虚拟现实的公路BIM感知与工程评价方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(7): 1402-1412.
Wu Zhaohui, Fu Zhiqiang, Wang Liang, et al. Study on Highway BIM Sense and Engineering Evaluation Methods of Virtual Reality[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(7): 1402-1412.
- [20] 何高奇, 郁明强, 蒋正清, 等. 基于VR火灾逃生游戏的应急行为评估系统[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(11): 2796-2803, 2810.
He Gaoqi, Yu Mingqiang, Jiang Zhengqing, et al. An Emergency Behavior Assessment System Based on the VR Fire Escape Game[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(11): 2796-2803, 2810.
- [21] 陆承, 靳学胜. 基于Steam VR的交互仿真水枪灭火训练系统设计[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(6): 1312-1319.
Lu Cheng, Jin Xuesheng. Design of the Interactive Simulation Water Gun Fire Extinguishing Training System Based on Steam VR[J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(6): 1312-1319.