

基于 VR 火灾逃生游戏的应急行为评估系统

何高奇^{1,2}, 郁明强¹, 蒋正清³, 卢兴见^{1,4*}

(1. 华东理工大学计算机科学与工程系, 上海 200237; 2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;
3. 华东理工大学艺术与传媒学院, 上海 200237; 4. 上海交通大学智慧城市协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 在突发事件场景中, 个体的行为和心理具有较强的复杂性和动态性, 是真实感群体行为模拟所面临的一大挑战。将虚拟现实和游戏技术相结合, 设计了虚拟现实火灾逃生游戏 VRFEG (Virtual Reality Fire Escape Game), 并对用户的应急行为进行有效的评估分析。VRFEG 主要由交互式情节设计、架构设计、数据采集和行为分析等四个模块组成。实验表明, VRFEG 系统具有直观、易用等特点, 能让人们在感受游戏刺激的同时学习到一些应急逃生的技能, 也为获取人们在突发状况下的部分行为数据提供了一个有效和有趣的通道。

关键词: 虚拟现实游戏; 行为评估; 应急演练; 游戏行为记录器; unity3d

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 11-2796-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711028

Emergency Behavior Assessment System Based on VR Fire Escape Game

He Gaoqi^{1,2}, Yu Mingqiang¹, Jiang Zhengqing³, Lu Xingjian^{1,4*}

(1. Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai, 200241, China;
3. College of Art Design and Media, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
4. Smart City Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Individuals' behavior and psychology have the typical features of complexity and dynamics under emergency, which is a great challenge for the realistic simulation of crowd behavior. In this paper, virtual reality and game technology are combined to design a *virtual reality fire escape game* (VRFEG), and *the users' emergency behaviors are evaluated and analyzed effectively*. VRFEG is mainly composed of four modules, i.e., interactive plot design, architecture design, data collection and behavior analysis. Experiment results show that the VRFEG system is very intuitive and easy to use. Such system could help people learn some emergency escape skills while immersing in the game. Moreover, it provides one efficient and interesting channel to acquire users' behavior data under emergency.

Keywords: virtual reality game; behavior evaluation; emergency drill; game behavior recorder; unity3d

引言

随着社会的发展、城市化进程的加快, 以及生

态环境的破坏, 各种灾害和突发事件频发。2015-08-12 深夜, 天津港中瑞海公司的危险品仓库发生火灾爆炸事故, 造成 165 人遇难, 798 人受伤, 以及巨大的经济损失^[1]。2014-12-31, 上海外滩的踩踏事件发生, 本是一场激动人心的跨年狂欢活动, 瞬间造成一场 36 死 49 伤的悲剧^[2]。我国幅员辽阔, 遭受的自然灾害种类也多种多样, 包括地震、



收稿日期: 2017-08-21 修回日期: 2017-09-18;
基金项目: 国家自然科学基金(61602175), 地理信息科学教育部重点实验室基金(KLGIS2015A05), 上海市软件和集成电路产业发展专项资金(150809), 工信部绿色制造系统集成项目(9908000006);
作者简介: 何高奇(1974-), 男, 安徽, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟现实和计算机动画。

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

• 2796 •

台风、洪涝等。面对这些突发状况, 增强人民的防范和逃生意识, 减轻灾害带来的损失就显得尤为重要。

为了提高人民群众的安全、自我保护意识, 以及自救能力, 逃生演习是一种重要手段。应急演练使得人们掌握积极避难的正确方法, 熟悉紧急疏散的步骤和路线, 确保在事故发生时能最大限度地进行自救和救人, 减少不必要的伤害。然而, 实际的逃生演练不仅耗时费力, 而且会受到周边环境和时间的诸多限制, 因而在真实环境下演习的机会并不多, 效果有限。因此, 人们渴望通过一种更适合大众的方式来体验和学习应急逃生的知识和技巧, 而研究人员也希望能有更好的方式来获取突发事件中人们的心理变化和行为反应以进行深度分析。

在另一方面, 随着科技的发展, 虚拟现实(Virtual Reality, VR)渐渐地走入了大众视野, 它是一种可以利用计算机来创建虚拟世界让人们沉浸在模拟环境中的技术^[3], 市场上已经有多款虚拟现实的游戏和设备供人娱乐学习。因此, 本文利用 VR 技术所带来的真实感和临场感, 将虚拟现实和应急演练结合起来, 制作一个模拟火灾突发事件的 VR 游戏, 既可以让人们感受游戏的刺激, 又能作为应急逃生演练和紧急逃生行为数据收集的工具。本方法不仅节省了大量的人力物力, 而且保障了实验人员的安全, 还能应急管理提供一种有效且有趣的新视角。

1 相关工作

Wood 于 1972 年首次研究火灾中人的行为^[4], 之后火灾场景中人的紧急逃生问题受到强烈关注。为了保证逃生实验的人员安全, 火灾紧急逃生相关的研究包括现场疏散演练和模拟仿真两大类。现场疏散演练是研究紧急逃生行为的一种常见方法, 将一定数量的人置于突发火灾场景, 然后观察记录逃生行为, 但此方法需要大量的时间、经济成本和人员开销, 容易受到环境等因素的限制^[5-6]。利用计算机进行模拟仿真是研究紧急逃生的另一种主要

方法, 可利用计算机程序来模拟人在危险状况下紧急逃生的行为^[7-8]。进一步, 人群行为模拟和情绪感染相结合, 可用来全面刻画火灾场景中的紧急逃生行为, 但人的心理和行为过于复杂, 所以研究结果的可用性有待提升^[9-10]。

面向紧急逃生的虚拟现实系统弥补了以上两种方法的缺点。孟凡兴等利用 6 块超大显示屏围成 360° 的视角, 并结合旋转椅实现 VR 系统来模拟火灾场景^[11]。近年来, 随着 VR 设备的不断发展, 对于紧急逃生的模拟技术也不断提升。2015 年, Sharma S 等利用 VR 实现了地铁站的逃生系统, 在沉浸式的虚拟环境中, 结合了计算机仿真和用户控制来实行逃生演练^[12]。Kinatader M 等用 VR 来研究火灾逃生的优劣, 并表示在未来看好 VR 技术在这一领域的应用^[13]。张磊等人中还原了高铁站的模型, 并提出有限细胞法来对火灾蔓延进行模拟研究^[14], 并利用问卷调查来获取被实验者的主观评估信息, 以进行综合评价^[11,15]。

目前, 虚拟现实和应急演练的融合度有限, 并且利用问卷调查来进行行为评估的方法缺乏客观实验数据的支持。结合现有研究, 本文针对火灾情况下紧急逃生的相关研究, 利用 Unity3D 引擎和 HTC VIVE 设计并开发了一个新颖的虚拟现实火灾逃生游戏(VRFEG), 提供逼真的体验, 实现更多的实验功能, 以便对灾场景中人的紧急逃生进行更深入的研究。

2 VRFEG 系统框架

为了对火灾逃生时人的行为进行有效评估, 本文利用 Unity3D 引擎和 HTC VIVE 设备实现基于虚拟现实的火灾逃生系统, 该系统的框架如图 1 所示。该系统可分为两大模块: 软硬件结合的 VR 火灾逃生游戏模块; 数据分析处理模块。

在第一模块中, 本文将 Unity3D 引擎和 HTC VIVE 两者结合来构建系统, 实现虚拟现实环境, 获取用户行为数据。Unity3D 引擎搭建模型场景并进行渲染来营造火灾现场, 结合 HTC VIVE 给用

户带来沉浸式的体验和丰富的交互方式。

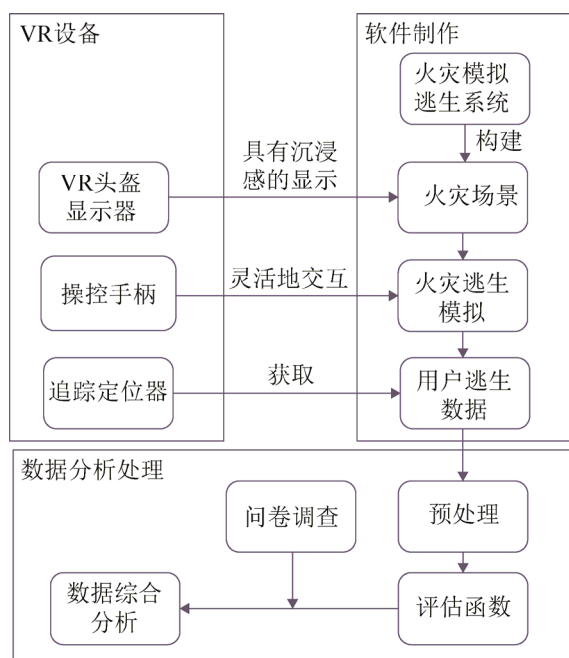


图 1 VR 火灾逃生系统
Fig. 1 VR fire escape system

在第二模块中，利用系统所得的实验数据，以数据驱动为核心找寻数据间的联系，获取和评估人的行为数据；通过问卷的形式获得的性别、年龄、教育程度和性格等个人信息和游戏体验数据，并设计评估函数对游戏数据进行分析。

通过对上述两种数据的综合分析，对玩家行为进行评估，获得数据之间的关系，进一步改善游戏系统。该方法不仅提升实验的安全性，节约大量的时间、精力和钱财，还能获得更加真实、客观的行为评估数据。

3 VRFEG 系统实现

该系统结合了虚拟现实技术和 3D 建模技术，完成了类似于游戏体验的模拟仿真。下面将从火灾逃生流程、火灾场景建模、UI 设计以及用户控制等四个方面来介绍虚拟火灾游戏体验系统。

3.1 火灾逃生流程

基于 Unity3D 引擎，本文设计了一个完整的火灾逃生流程，如图 2 所示。用户在戴好 VR 设备后，

进入虚拟世界。在游戏教程的引导下，用户熟悉虚拟环境中利用手柄控制对象移动的方法。然后，游戏系统渲染出火灾场景，用户将依靠自己的智慧，确定逃离危险区域的行为和路线。

在游戏运行过程中，如果用户在逃生时触碰到火焰，则会扣除一定的生命值，当生命值为 0 时结束游戏。只要用户在规定时间内逃出火灾区域，则用户成功完成游戏。当游戏结束时，系统根据用户逃生时间和剩余生命值对用户行为进行评估打分。

VRFEG 构建了包含两个楼层的游戏场景。二楼的火灾场景结构如图 3 所示，玩家从起始位置便可看到走廊尽头处的火焰。若沿着走廊往前走，在拐角处用户可以看到楼梯口的附近还有一处着火点。一楼的火灾场景结构如图 4 所示，下楼梯时，可以观察到正前方与右边分别有一团火焰，左侧的拐角处也设有一个着火点。此处与二楼着火点相对应，反应了二楼的火蔓延到一楼的情况，作用是凸显火势很大。最后穿过狭长的走廊就到达一楼处的出口，就能脱离危险区域。

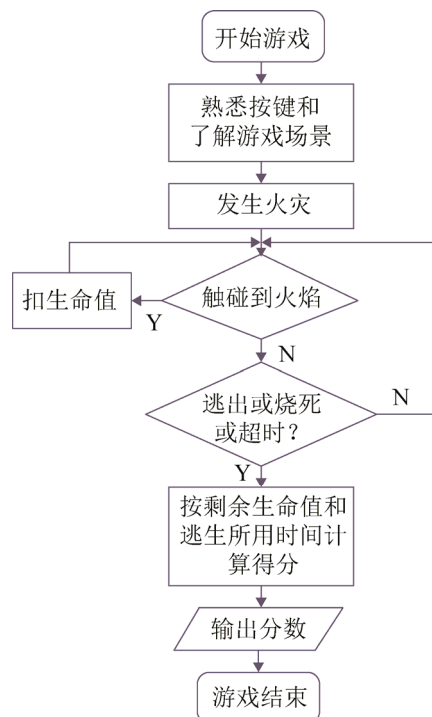


图 2 火灾逃生流程图
Fig. 2 Fire escape flow diagram



图 3 二楼火灾场景结构图

Fig. 3 Fire scene structure diagram of the second floor

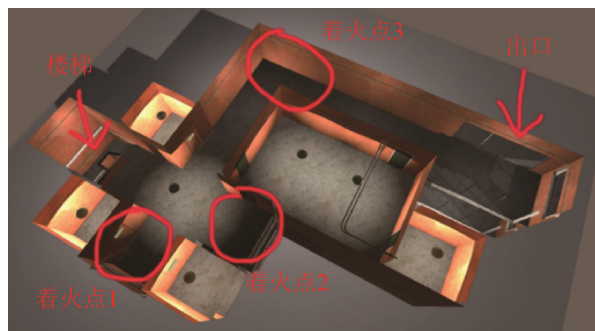


图 4 一楼火灾场景结构图

Fig. 4 Fire scene structure diagram of the first floor

该场景中的所有门都是可以打开的, 只要玩家控制角色走向门的位置并近距离触碰就能打开, 这个设计的目的主要有两点:

(1) 增加玩家的逃生路线的多样性, 提供了逃生的多种可能。

(2) 增加游戏难度。路线中包含不少封闭的小房间, 当玩家在没有地图还不断进进出出的时候就容易迷失方向, 增加了玩家在危险处境中逗留的时间, 能获取更多的用户数据用于分析。

3.2 火灾场景建模

考虑到 VR 游戏的体验主要来自视觉和听觉, 我们针对场景中的这两大要素进行调节和优化。视觉方面, 本文通过调节场景亮度使玩家获得更好的游戏体验。在建筑中较暗的位置(长长的走廊中间和楼梯拐角处)通过添加点光源的方法进行亮度调节, 之后分别对场景中物体的摆放、色调搭配根据游戏背景来做出调整^[16]。听觉方面, 根据游戏背景和游戏进度选择不同的背景音乐和提示音进行

播放。通过上面的设置, 能使玩家游戏体验得到提升, 然而, 进入玩家视野的除了游戏场景还有灵活的用户界面。

3.3 UI 设计与实现

在该 VR 游戏中, UI 界面主要由四部分构成:

1) 游戏界面中心的文本框。在游戏结束时, 用 success 和 fail 显示玩家游戏成功或失败, 并用数字显示玩家的游戏得分。

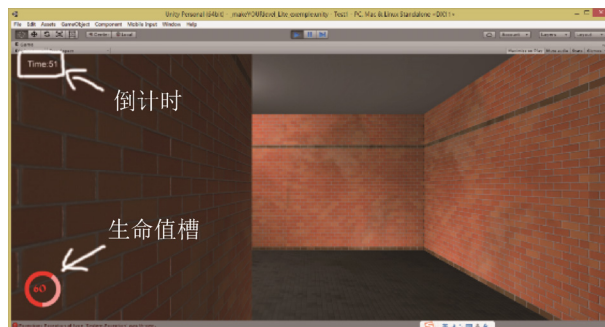


图 5 UI 中倒计时和生命值槽

Fig. 5 Timer and health point in UI

2) 屏幕左下角的生命值显示槽和剩余生命值文本框。生命值显示槽是一个圆环, 由两张图片覆盖形成, 用来显示剩余生命值所占的百分比。在剩余生命值框中, 数值显示用户的剩余生命值。这两种图示相结合, 能够更生动、直观的描述用户游戏时的实时状态。

3) 屏幕左上角的倒计时文本框。倒计时文本负责展示剩余的逃生时间, 在游戏中给用户一定的紧迫感, 更有应急逃生的危机感。

4) ReStart 按钮, 位于界面中心文本的正下方。ReStart 按钮在游戏结束时会在界面中显示, 点击按钮可以重新开始游戏。

3.4 控制方式

由于结合了 HTC VIVE, 我们放弃了传统的键盘加鼠标的控制方式, 取而代之的是 VR 头盔与手柄的使用。VR 头戴式显示器除了能显示具有沉浸感的图像之外, 还可以利用头部的旋转来查看周围环境以及改变用户行走的方向。按下手柄上的按钮

可以使虚拟场景中的角色向前行走、奔跑或者向上跳跃。手柄作为肢体的延伸,作为手臂可以打开场景中的门,之后便可通过。实验发现利用新奇的 VR 设备进行有趣的交互,较大地提高了被实验者的兴趣和积极性。

4 数据驱动的应急行为评估

数据是 VRFEG 的核心部分之一。本章节将从数据采集、评估函数两个方面来详细阐述以数据驱动为核心的应急行为评估方法。

4.1 数据采集

VRFEG 主要通过调查问卷和系统后台自动记录两种方式收集用户的基本信息和游戏数据,其中游戏数据包括玩家在各个时刻的位置、完成游戏所花费的时间和剩余生命值等。

1) 调查问卷

问卷调查的设计思路主要有两部分:

(1) 收集个人信息,与游戏中获取的数据综合分析,找到不同因素之间的联系和不同玩家的行为风格和趋势。

(2) 了解玩家们对该游戏的看法,用于进一步完善游戏系统,提升游戏体验。问卷调查内容如下:

①您的性别(男 m or 女 f)

②您的年龄(10 岁及以下、11-20 岁、21-30 岁、31-40 岁、41-50 岁、51-60 岁、61 岁及以上)

③您的职业(在校学生、老师、程序员、建筑师、商人、管理人员、工人等)

④您的最高学历(初中及以下、高中 or 中专、大学或大专、硕士、博士及以上)

⑤您的性格特征(多选)(外向、内向、谨慎、保守、腼腆、果敢、活泼、冲动、敏感等)

⑥您对紧急逃生知识的了解程度(极少、无、一般、较熟练、很熟练)

⑦您对该游戏界面和场景的评价(很差、差、一般、好、很好)

⑧您对游戏行动控制方式的满意度(很差、差、

一般、好、很好)

⑨您对游戏难易度评价(太轻松、简单、一般、困难、噩梦)

⑩对类似的 3d 游戏熟悉程度(第一次玩、稍有所了解、一般、高手、大神)

2) 游戏行为记录器

在用户体验火灾逃生的同时,系统会调用 C# 脚本,记录游戏中的用户数据,包括逃生花费的时间、剩余生命值、逃出是否成功以及各个时刻对应的玩家坐标信息等,并将这些数据写入 MySQL 数据库。本文使用 VS2015 的版本中的 C#脚本,完成与 MySQL 数据库交互的功能,便于存储和读取。

4.2 评估函数

本文基于安全逃生和限时逃生的基本准则,设计了用于评价玩家进行虚拟火灾逃生的表现。游戏评分不仅可以区分玩家的游戏水平,更能体现游戏的公平、公正,加强游戏的竞争性,丰富游戏的内容。基于该应急逃生游戏的内容,较高的分数除了体现玩家较强的游戏水平,还表明了这些玩家可能具有较强的逃生能力和自救能力。

在该火灾逃生游戏中,逃生方式是否安全是关键因素之一,极大地决定了用户的游戏得分。系统会对危险的行为做出扣除一定生命值的处罚。如果用户控制的角色被火烧到多次导致生命值为零,游戏结束并直接判为零分,说明用户在逃生时不注重自身的保护,没有与火焰保持距离,这是非常危险的行为。另一关键因素是逃生速度,没有在规定时间内逃出危险区域也会获得较低的游戏得分。

分数最高为 100 分,最低是 0 分,数据类型是整型。我们分别给时间奖励分数和生命值奖励分数 50 分的分值,总分为 100 分。总时间是 60 s,总生命值为 100。我设计的游戏评分函数公式如下:

$$s = \begin{cases} 0, & t = 60 \text{ or } h = 0 \\ 50 + \frac{h^2}{200}, & 0 \leq t \leq 10, 0 < h \leq 100 \\ 5\sqrt{2(60-t)} + \frac{h^2}{200}, & 10 < t < 60, 0 < h \leq 100 \end{cases}$$

$s(\text{score})$ 是游戏结束时的得分, t 是逃生所花费的时间, h 是剩余生命值。

该公式的设计原理: (1) 重要性: 时间和剩余生命值各占 50 分, 因为减少逃生时间和注重自我保护同样重要; (2) 玩家的区分度: 从剩余时间上看, 在 [50,60] 这段区间上玩家数量几乎为 0, 而直在 [0,25] 上的人数比 [25,50] 人数要多, 为了增大得分在 [0,25] 区间内的玩家的区分度使用了根式。同理, 从剩余生命值的角度看, 在 [60,100] 的人数要比在 [0,60] 的玩家数量多, 所以使用了平方项; (3) 实际意义: 逃生用时更少的和逃生受伤更少的, 应该给予更多的奖励, 所以选择用递增函数来表现, 而且尽量少受伤和安全逃生, 应该是我们优先追求的, 用平方中导数更大的部分来描述这一阶段。

5 用户行为分析

本次采集数据人数为 21 人, 性别分布: 男性 16 人, 女性 5 人, 年龄结构分布: 20~30 岁有 19 人, 40~50 岁 1 人, 50~60 岁 1 人。

5.1 个体性格特征的分析

根据各种因素, 得到性别、性格等多种影响因素对玩家游戏得分的影响, 如表 1 所示。

表 1 性别、性格等多种因素对玩家游戏得分的影响
Tab. 1 Influence of gender, personality and other factors on player scoring

因素	分类	期望	标准差	方差
性别	男	45.3	33.9	1 148.3
	女	37.6	23.3	542.8
性格	外向	57.4	24.1	580.0
	内向	30.7	32.7	1 067.0
	活泼果敢冲动	54.5	27.2	737.4
	谨慎敏感保守	35.2	31.7	1 007.2
紧急逃生知识掌握	熟练以上	36.6	41.9	1 756.3
	一般	49.6	28.6	818.1
	极少及以下	34.4	32.7	1 070.8
3D 游戏能力掌握	高手	73.4	3.9	15.6
	一般	38.0	29.1	849.3
	较弱	9.3	14.7	215.5

根据不同用户的游戏得分计算出表 1 中的期

望和方差。表 1 表示男性的平均得分略微比女性高一点, 但是波动更大。对于其他数据间的关系, 本文将用图表来进行分析。

图 6 表示外向、活泼、勇敢、冲动型的性格比内向、谨慎、敏感、保守型的在游戏中的表现更好, 而且波动更小。

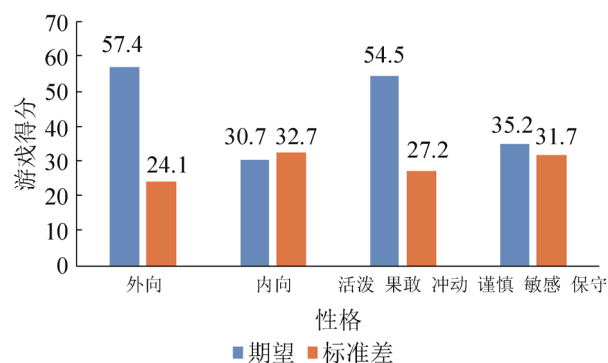


图 6 性格对游戏得分的影响
Fig. 6 Impact of personality on game scoring

5.2 逃生游戏能力分析

图 7 表示玩游戏能力越强的人玩该游戏的得分也越高, 比较符合实际情况。然而, 图 8 表示对紧急逃生知识掌握程度与游戏得分并不成正相关, 与预期有所不同。说明该系统尚无法准确地反映出用户对逃生能力的掌握程度。与系统的交互方式可能更接近游戏的形式, 因此游戏能力的强弱反而对结果的影响更加明显。未来本文将对在紧急状况下的仿真模拟技术做进一步的提升。

虽然由数据得到男性玩家的平均得分高于女性玩家, 然而图 9 显示男性玩家中游戏高手的比例远大于女性。这说明表面上是性别带来的分数差异, 实质可能是男性玩家更擅长玩 3D 游戏或者是男性中接触游戏的人比女性要多。

图 10 表示, 不论男女, 随着游戏水平的提高, 游戏得分期望越高, 进一步说明游戏水平与玩家的游戏分数成正相关。图中在高手一列中, 因为样本空间较小, 导致女性的游戏高手人数为 0, 并不是游戏得分为 0。在稍有和一般两列中, 女性的得分都比男性要高, 可能是由于女性的游戏表现更好或

者是因为女性对自己的评价更准确, 男性高估了自己的玩 3D 游戏的能力, 当然也可能是样本空间较小带来的差异。

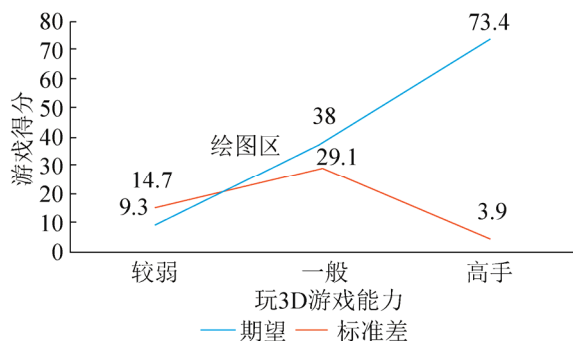


图 7 游戏能力对游戏得分影响的折线图
Fig. 7 Impact of game ability on game scoring

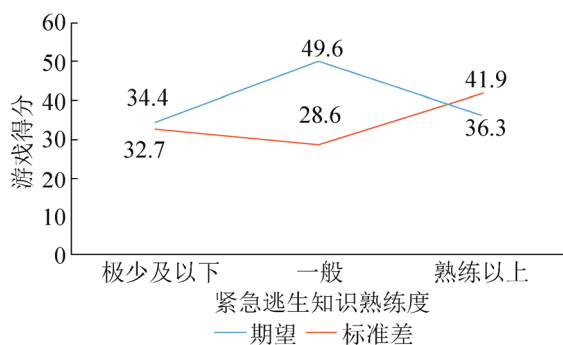


图 8 逃生知识掌握程度对游戏得分的影响
Fig. 8 Influence of mastery of escape knowledge on game scores

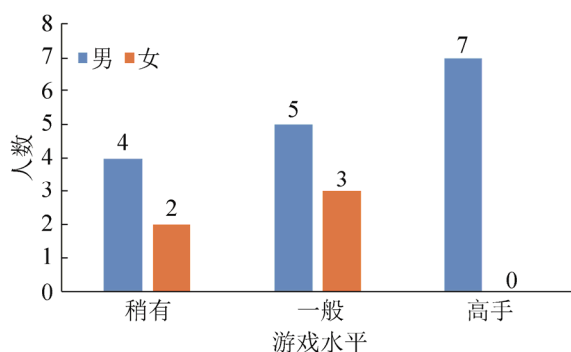


图 9 不同性别的游戏能力分布
Fig. 9 Game ability distribution of different genders

图 11 和图 12 是利用 MATLAB 将玩家各时刻的位置点连成的完整轨迹图。图 11 表示某玩家第一次玩时轨迹凌乱, 有不少多余的行动轨迹, 比如走进一个封闭的房间, 但是第二次玩时, 行动干净

利落, 没有多余的行动, 直奔终点。由此, 我们看出演练的效果非常明显, 假设第一次是火灾演习, 参与过演习的人在遇到灾难时的行动可能更接近第二次的轨迹。因此, 在实际应用中, 我们可以将实际场景做成虚拟游戏场景供人们进行模拟演练, 使其在熟悉环境的同时也能掌握较好的逃生路线, 达到模拟演练的预期效果。

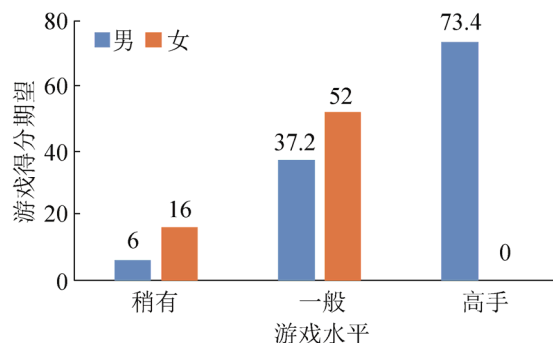


图 10 性别、游戏水平对游戏得分的影响直方图
Fig. 10 Impact of sex and game ability on game scores

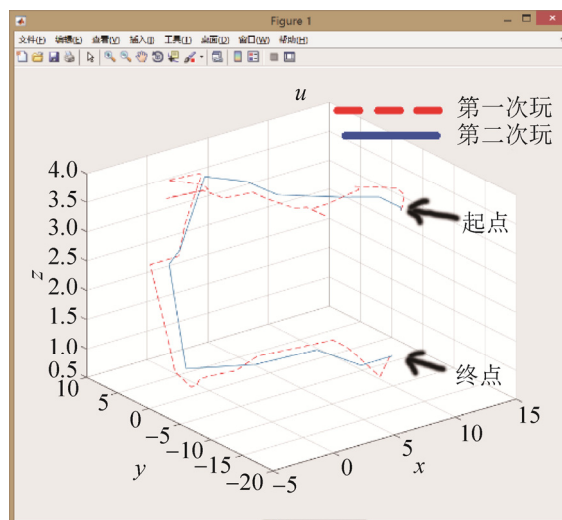


图 11 某玩家第一次和第二次玩应急逃生游戏的行动轨迹
Fig. 11 Trajectories of a player's first and second movement

图 12 显示对于游戏水平相近、性格相似的不同玩家, 在无紧急标识的情况下, 行动轨迹更凌乱, 会走更多弯路, 也更容易走进死路, 而有紧急逃生标识时玩家表现更好。由数据可得, 在有紧急逃生标识的情况下玩家逃生时间比无标识的情况平均短 13.2 s。因此, 本文通过分析玩家行动轨迹不断调整紧急标识的位置, 使之更容易被玩家发现, 进

而为其指引方向^[17]。同时, 从图中看出熟悉建筑场景更有利于找到较好的路线进行逃生, 因此, 出于安全的考虑, 除了传统的安全出口的标志外, 在较大较复杂的建筑内放一些简易地图用于指示路线也是一个可行的方案。

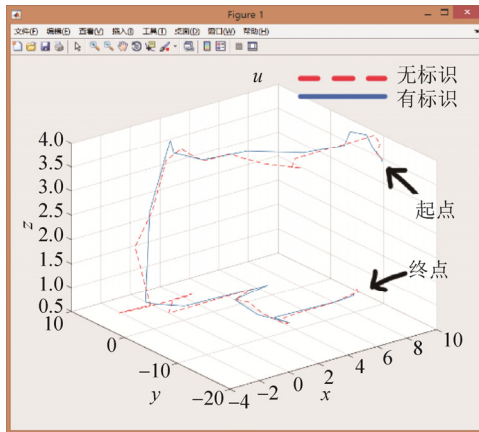


图 12 紧急逃生标识对行动轨迹的影响

Fig. 12 Influence of emergency escape sign on trajectory

6 结论

本文将虚拟现实和游戏技术相结合, 设计了一个虚拟现实火灾逃生游戏(VRFEG), 并对用户的应急行为进行有效的评估分析。基于 HTC VIVE 来实现交互式情节设计, 并利用 Unity3D 引擎结合 C#脚本实现了游戏场景漫游、视角转换、游戏时间计时和生命值计算等功能, 能让人们在感受游戏刺激的同时学习到一些应急逃生的技能。通过调查问卷和游戏行为记录器来获取用户的个性特征和运动特征数据; 并利用统计学方法进行行为分析评估, 为获取人们在突发状况下的部分行为数据提供了一个有效和有趣的通道。

参考文献:

[1] 刘怡君, 陈思佳, 黄远, 等. 重大生产安全事故的网络舆情传播分析及其政策建议——以“8·12 天津港爆炸事故”为例[J]. 管理评论, 2016, 28(3): 221-229.
Liu Yijun, Chen Sijia, Huang Yuan, et al. The Analysis and Policy Recommendations on the Spread of Network Public Opinion in Major Production Safety Accidents—A Case Study of the 8·12 Tianjin Port Explosion[J].

Management Review, 2016, 28(3): 221-229.
[2] 闪淳昌. “12·31”上海外滩踩踏事件的调查与思考[J]. 江苏社会科学, 2015(4): 1-6.
Shan Chunchang. Investigation and Thinking on Dec.31, 2014 Shanghai Stampede[J]. Jiangsu Social Sciences, 2015(4): 1-6.
[3] 姜学智, 李忠华. 国内外虚拟现实技术的研究现状[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2004, 23(2): 238-240.
Jiang Xuezhi, Li Zhonghua. Present situation of vr researching at home and abroad[J]. JOURNAL OF LIAONING TECHNICAL UNIVERSITY, 2004, 23(2): 238-240.
[4] Wood P G. THE BEHAVIOUR OF PEOPLE IN FIRES[J]. Fire Safety Science (S1004-5309), 1972, 953: 1-1.
[5] Nilsson D, Johansson M, Frantzich H. Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations[J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 2009, 44(4): 458-468.
[6] P.Å Olsson, M.A Regan. A comparison between actual and predicted evacuation times[J]. Safety Science (S1003-3033), 2001, 38(2): 139-145.
[7] Thompson P A, Marchant E W. A computer model for the evacuation of large building populations[J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 1995, 24(95): 131-148.
[8] Owen M, Galea E R, Lawrence P J. The Exodus Evacuation Model Applied To Building Evacuation Scenarios[J]. Journal of Fire Protection Engineering (S1042-3915), 1996, 8(2): 65-84.
[9] HATFIELD E, CACIOPPO J T, RAPSON R L. Emotional Contagion[J]. Current Directions in Psychological Science (S1467-8721), 1993, 2(3): 96-99.
[10] DU J, FAN X, FENG T. Multiple emotional contagions in service encounters[J]. Journal of the Academy of Marketing Science (S2095-6134), 2011, 39(3): 449-466.
[11] 孟凡兴, 张伟. 火灾下紧急逃生的虚拟现实系统开发与评估[J]. 清华大学工业工程系: 人类工效学, 2013, 19(2): 23-26, 41.
Meng Fanxing, Zhang Wei. Development and Evaluation of A Virtual Reality System of Fire Emergency Escape[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2013, 19(2): 23-26, 41.
[12] Sharma S, Jerripothula S, Mackey S, et al. Immersive virtual reality environment of a subway evacuation on a cloud for disaster preparedness and response training[C]// IEEE, 2015: 1-6.
[13] Kinatader M, Ronchi E, Nilsson D, et al. Virtual reality for fire evacuation research[C]//Computer Science and Information Systems. IEEE, 2015: 313-321.

(下转第 2810 页)

- [4] Wang A H, Sai S T, Liu Y M, et al. The High Computer Technology Application Study about the Daily-use Ceramic Products Design [J]. Ieri Procedia, 2014, 10: 184-189.
- [5] 康修机, 毛宏萍. 景德镇日用陶瓷设计的发展与数字化技术[J]. 中国陶瓷, 2005, 41(2): 25-27.
Kang Xiujie, Mao Hongping. Jingdezhen ceramic design and development of digital technology [J]. China ceramics, 2005, 41 (2): 25-27.
- [6] 徐田. 平面设计软件在陶瓷装饰设计中的应用研究[D]. 景德镇陶瓷学院, 2009, 5: 5-10.
Xu Tian. Application of graphic design software in ceramic decoration design [D]. Jingdezhen Ceramic Institute, 2009, 5: 5-10.
- [7] 周晓成. 基于 3DS MAX 动画技术的陶瓷产品设计应用研究 [D]. 景德镇陶瓷学院, 2012: 10-15.
Zhou Xiaocheng. Application Research of ceramic product design based on 3DS MAX animation technology [D]. Jingdezhen Ceramic Institute, 2012: 10-15.
- [8] 张三聪, 蒋汐. 浅谈陶瓷产品效果图的数字表现[J]. 中国陶瓷工业, 2007, 14(6): 48-50.
Zhang Sancong. Jiang Xi Digital expression of effect diagram of ceramic products [J]. China ceramic industry, 2007, 14 (6): 48-50.
- [9] 程燕. 浅谈三维打印对现代陶艺的影响[J]. 轻工科技 2014, 11: 96-97.
Cheng Yan. The influence of three dimensional printing on modern ceramic art [J]. Light industry science and technology 2014, 11: 96-97.
- [10] 杨超. 构建景德镇数字陶瓷博物馆的研究实践[J]. 中国陶瓷. 2015, 51(11): 51-56.
Yang Chao. Research and practice of constructing Jingdezhen digital Ceramic Museum [J]. Chinese ceramics. 2015, 51 (11): 51-56.
- [11] 易湘信. 现代陶瓷艺术创作研究[D]. 湖南师范大学. 2012, 5: 21-28.
Yi Xiangxin. Modern ceramic art research [D]. Hunan Normal University. 2012, 5: 21-28.
- [12] 朱珊虹. 基于 Web3D 的陶瓷产品展示研究与应用[D]. 景德镇陶瓷学院, 2010.
Zhu Shan hong. Research and application of ceramic product display based on Web3D [D]. Jingdezhen Ceramic Institute, 2010.
- [13] 张艳丽, 谭同德, 赵新灿, 等. 基于 OSG 的虚拟化学实验平台的构建设计[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(12): 2909-2913.
Zhang Yanli, Tan Tongde, Zhao Xincan, et al. Construction and design of virtual chemistry experiment platform based on OSG[J]. computer engineering and design, 2010, 31 (12): 2909-2913.
- [14] 王琳. 浅谈拉坯制作在陶艺实验教学中的意义[J]. 科教导刊, 2014, 4(47): 119-120.
Wang Lin. Discussion on throwing pottery production in experimental teaching of [J]. Science Herald, 2014, 4 (47): 119-120.
- [15] 韩丽娜, 耿国华. 使用多段 Bezier 曲线模型的地质等值线光滑算法 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(11):63-65.
Han Lina, Geng Guohua. A smoothing algorithm for geological contours using a multi segment Bezier curve model[J]. Computer engineering and science, 2010, 32 (11): 63-65.
- [16] 张超, 王文静. 一种改进的折线分段 Bezier 曲线的拟合方法[J]. 测绘通报, 2011, 12: 72-74.
Zhang Chao, Wang Wenjing. An improved fitting method for broken line piecewise Bezier curves [J]. Surveying and mapping bulletin, 2011, 12: 72-74.

(上接第 2803 页)

- [14] 张磊, 朱国庆, 郭大刚. 基于 VR 的公共建筑火灾逃生训练系统研究[J]. 消防科学与技术, 2015(4): 526-529.
ZHANG Lei, ZHU Guo-qing, GUO Da-gang. Study on fire escape training system base on VR[J]. Fire Science and Technology, 2015(4): 526-529.
- [15] 杨立兵, 王亮, 陈建宏, 等. 企业火灾疏散人员行为及心理特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(5): 3-9.
Yang Libing, Wang Liang, Chen Jianhong, et al. Research into Behavior and Psychological Characteristics of Evacuees from Enterprise on Fire[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(5): 3-9.
- [16] 夏力前, 汪元卉. 3D 游戏场景中的火焰效果的真实模拟[J]. 电脑与电信, 2013(10): 65-67.
Xia Liqian, Wang Yuanhui. The Real Simulation of Flame Effect in 3D Game Scene[J]. Computer & Telecommunication, 2013(10): 65-67.
- [17] Tang C H, Wu W T, Lin C Y. Using virtual reality to determine how emergency signs facilitate way-finding[J]. Applied Ergonomics (S0003-6870), 2008, 40(4): 722-730.