

基于个性化情绪感染的人群动画生成方法

曹梦晓 张桂娟 黄丽君 刘弘

(山东师范大学信息科学与工程学院 济南 250014)

(山东师范大学山东省分布式计算机软件新技术重点实验室 济南 250358)

摘要 当前基于情绪的人群动画方法没有考虑个性对情绪感染的影响。现实中的人群情绪(如恐慌、焦虑等)往往存在个体差异性,从而会对人群的情绪感染产生重要的影响。为生成更为逼真的人群动画,提出一种基于个性化情绪感染的人群动画生成方法。该方法包含3部分:首先,建立了一个基于情绪感知因子的个性化 Durupinar 情绪感染模型(Personalized Durupinar, P-Durupinar),该模型能够有效体现人群情绪的个体差异性;其次,将 P-Durupinar 情绪感染与人群运动耦合,结合相对速度障碍法,利用个性化情绪驱动人群运动;最后,使用真实感渲染方法生成人群动画。实验结果表明,基于个性化情绪感染的人群动画生成方法能够更逼真地仿真人群的社会行为。

关键词 人群动画,个性,P-Durupinar 情绪模型

中图分类号 TP319 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.054

Crowd Animation Generation Method Based on Personalized Emotional Contagion

CAO Meng-xiao ZHANG Gui-juan HUANG Li-jun LIU Hong

(School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

(Shandong Provincial Key Laboratory for Distributed Computer Software Novel Technology, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract At present, most of crowd animation methods only simulate the emotion of behavior rather than consider the impact of human personality on the emotion. In the real world, one's emotion (e. g., panic, anxiety) often differs from others which is called personality difference. In order to generate more realistic crowd animation, we presented a crowd animation method based on personalized emotional contagion model. The method is divided into three parts. Firstly, we provided the emotion perception factor and introduced the P-Durupinar model which shows the crowd's diversity effectively. Secondly, the P-Durupinar model was coupled with the crowd motion. Combined with the reciprocal velocity obstacle, we could activate the crowd's motion. Finally, the photo-realistic rendering method was employed to obtain the crowd animation. Experimental results show that our personalized emotional contagion-based crowd animation method can simulate the crowd social behavior more realistically.

Keywords Crowd animation, Personality, P-Durupinar emotional contagion model

1 引言

在计算机图形学领域,人群动画^[1]是近几年的研究热点之一。人群动画主要对人群的行为进行仿真,而这些社会行为都会出现情绪感染现象,情绪感染又会受到个性的影响。因此,真实的模拟个性对情绪的影响具有很重要的意义。

个性是个体在社会活动中区别于其他个体的独特精神面貌和心理特征的体现。与情绪不同,个性是个体的固有属性,不会随着场景的变化而改变,不同个性的个体具有不同的情绪感知能力。因此,模拟情绪因素影响的人群运动,不仅需要考虑情绪感染对运动的影响,还需考虑个体的个性对情绪感

染的影响,具有很大的挑战性。目前,在情绪感染中,比较经典的模型是基于流行病学的 Durupinar 情绪感染模型^[2],该模型是连续的概率阈值型模型,具有两种情绪状态,建模简单。但是该模型只是单纯地对情绪进行建模,没有考虑个性对情绪感染的影响。

本文提出了基于个性化情绪的人群动画生成方法。首先在 Durupinar 情绪感染模型^[2]的基础上提出情绪感知因子,建立个性化的 P-Durupinar 情绪感染模型;其次将该模型与人群运动耦合,结合相对速度障碍法(Reciprocal Velocity Obstacles, RVO)^[3],利用情绪驱动人群运动;最后使用真实感渲染方法获取人群动画效果。实验结果表明,本文方法能够在人群运动中实现情绪感染下的真实人群行为。

到稿日期:2016-02-23 返修日期:2016-06-06 本文受国家自然科学基金(61272094,61472232,61373149,61572299,61402269,61402270),山东省自然科学基金(ZR2014FQ009)资助。

曹梦晓(1992-),女,硕士生,主要研究方向为计算机动画,E-mail:1229795346@qq.com;张桂娟 女,博士,副教授,主要研究方向为计算机动画;黄丽君 女,硕士生,主要研究方向为计算机动画;刘弘 女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式人工智能、软件工程和计算机辅助设计等。

2 相关工作

2.1 情绪感染模型

VU 大学的研究者提出了基于热力学机制的 ASCRIBE 情绪感染模型^[4]。该模型为每一对情绪传染的个体定义了 5 个参数,通过热传递的方式进行情绪感染。但是 ASCRIBE 情绪感染模型建模复杂,并且没有考虑个性对情绪的影响。Dodds^[5]提出基于流行病学的情绪感染模型,该模型大体分为两种:永久免疫模型(SIR)^[5]和临时免疫模型(SIRS)^[5]。但是这些模型的情绪状态多,计算过程耗时长。在现实中,个体大多只需考虑 S 和 I 两种情绪状态。Durupinar^[2]提出具有两种情绪状态的 Durupinar 情绪感染模型,模型建模简单,计算效率高,但是该模型没有考虑个性对情绪的影响,感染者只是单纯地从传染者那里复制情绪,情绪没有强弱之分。

与已有方法不同,本文建立基于个性化的 P-Durupinar 情绪感染模型,该模型在 Durupinar 情绪感染模型的基础上提出情绪感知因子,对情绪划分等级,并将其表现在人群动画中。

2.2 人群运动模拟与计算

人们试图通过心理特征创建多样化的运动行为。例如,文献^[6-7]模拟了由于性格不同引起的行为变化。Kim 等人^[8]提出了一种动态心理影响下的人群仿真方法,既考虑了个体稳定的性格,又考虑了外部环境变化时的人群行为变化。刘箴^[9]提出了一种个性模型来模拟个性对人的影响。但是这些模型主要在小群体中表达个体运动的差异性,并未应用于大规模人群仿真。金炜等^[10]对火车站站台拥挤情形下的人群情感感染进行了研究,但是没有考虑个性对情绪感染的影响。

在虚拟场景中,个体从初始位置到达目标的过程可分为两个步骤:全局路径规划和局部避障,根据两者是否同时考虑,可将当前方法分为两类:全局模型和局部模型。全局模型同时具有全局导航和局部避障。例如蒋浩等^[11]使用全局势能场的方法模拟人群运动;王兆其等^[12]提出了一种基于连续群体算法的人群运动模拟方法。但是这些方法计算耗时,运算效率较低。

局部模型将全局路径规划和局部避障分开考虑。在全局路径规划方面,周明秀等^[13]提出改进蚁群算法搜索路径,但是计算耗时;Burchan 等^[14]提出的 Roadmap 方法能够在复杂场景中快速搜索路径。局部避障解决了个体与动态障碍物之间的碰撞,例如 Fiorini 等^[15]提出 VO 算法进行碰撞避免,但是 VO 算法易产生抖动;Jur 等^[2]提出 RVO 算法,解决了 VO 算法的抖动问题。本文使用 Roadmap 技术进行全局路径规划和导航,并结合 RVO 避障运动实时改变人群的运动速度,利用个体情绪驱动速度的变化。

3 算法框架

本文算法的输入是人群动画的初始条件,即场景模型、情绪感染、虚拟人位置信息。如图 1 所示,给定输入以后,本文的方法分两个步骤进行,即情绪感染和人群运动。首先,建立基于个性化的 P-Durupinar 情绪感染模型,对每个个体随机

初始化情绪值,其中圆点表示未感染情绪的个体,叉号表示已感染情绪的个体;其次,将该模型与 RVO 运动耦合,人群在运动过程中出现情绪感染并反作用于人群,影响人群运动;最后,结合真实感渲染技术获取每一帧的人群动画。接下来将详细介绍每个步骤的具体实现方法。

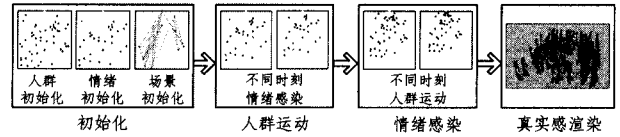


图 1 本文方法框架图

4 个性化情绪感染

个体聚在一起就会出现情绪感染现象,外部环境的突然变化又会加速此感染现象的产生,而不同的个性会对这种感染现象的效果产生最直接的影响,进而影响整个群体运动。本文提出个性化情绪感染模型(P-Durupinar 情绪感染模型),对人群中的情绪感染现象进行建模。

4.1 个性化情绪感染模型——P-Durupinar

P-Durupinar 情绪感染模型在 Durupinar 情绪感染模型的基础上提出了情绪感知因子,对 Durupinar 情绪感染模型的情绪进行等级划分。在 P-Durupinar 情绪感染模型中,对个体个性分类,不同个性的个体具有不同的情绪感知能力。该模型把个体划分为两种类型:已感染情绪个体(I)和未感染情绪个体(S)。

在 P-Durupinar 情绪感染模型中,当 S 个体遇到 I 个体时,会接收 I 个体情绪的影响,有被感染的概率。模型用一个情绪值变量来表示个体所处的情感状态,模型设定一个邻居变量,它记录遇到感染的个体数量,遇到的已感染个体越多,被感染的可能性越大。

4.2 P-Durupinar 情绪感染模型参数

(1) 模型参数定义

在 P-Durupinar 情绪感染模型中,对于每个个体定义 $\{e, q, Q, T\}$ 4 个变量,其定义如表 1 所列。

表 1 P-Durupinar 情绪感染模型参数

符号	意义
e	个体情绪值
q	个体恐慌量
Q	个体恐慌累积量
T	个体阈值

其中:

$$q_i = \log - N(\mu_{q_i}, \sigma_{q_i}^2) \quad (1)$$

$$T_i = \log - N(\mu_{T_i}, \sigma_{T_i}^2) \quad (2)$$

$$Q(t) = \sum_{t'=t-k+1}^t q_j(t') \quad (3)$$

其中, t 表示运动时间步; i, j 表示个体; μ 和 σ^2 分别表示期望和方差; $\log - N$ 是一个对数正态分布函数, q 和 T 通过对数正态分布函数计算; k 表示个体的上一个时间步。

(2) 智能体的个性和情绪

借鉴心理学学者 Jung^[16]对个性的划分,本文将个体的个性划分为保守、稳健和激进 3 种类型。其中,激进型个体感知

情绪能力最强,其次是稳健型个体,最后是保守型个体。本文将无情绪个体的情绪值 e 设为 0, 有情绪个体的情绪值 e 设定在 $(0, 1]$ 之间。借鉴文献[17], 在感染过程中按照不同个性将感染情绪个体的情绪值 e 划分为 3 类, 分别对应 3 种不同的情绪状态, 用于对人群运动速度的计算, 具体表述如表 2 所列。

表 2 个性与情绪值划分

p 的值	个性分类	个性特质	e 的值	情绪状态
$[0, p_1]$	保守型	冷静、谨慎	$(0, 0.4]$	轻度恐慌
$(p_1, p_2]$	稳健型	随和、较冷静	$(0.4, 0.8]$	中度恐慌
$(p_2, 1.0]$	激进型	冲动、敏感	$(0.8, 1.0]$	极度恐慌

其中, 本文定义人群情绪感知因子为 p , 可以结合实际场景, 通过调节 p_1 和 p_2 的值确定不同个性人数的比例。

4.3 P-Durupinar 算法流程

在本算法中, 个体与其邻居的距离通过半径 R 进行控制。

算法 1 个性化情绪感染模型算法

输入: $\mu_q, \sigma_q^2, \mu_T, \sigma_T^2, R, P_1, P_2$

输出: e_i

- step 1 利用 p_1 和 p_2 的值, 根据表(2)随机初始化情绪感知因子 p ;
- step 2 将所有个体分为已感染情绪和未感染情绪两类;
- step 3 对未感染情绪个体进行初始化: $e=0; q=0; Q=0$; 利用 μ_T 和 σ_T^2 并根据式(2)计算 T ;
- step 4 对已感染情绪的个体进行初始化 $e=1.0; Q=0$; 利用 μ_T 和 σ_T^2 并根据式(2)计算 T , 利用 μ_q 和 σ_q^2 并根据式(1)计算 q ;
- step 5 在每个时间步 t 对未感染个体的情绪值 e 进行更新, 执行以下操作。
 - step 5.1 利用个体之间的距离 dis 计算 k 时间步内个体邻居数量, 如果 $dis < R$, 则两个个体成为邻居;
 - step 5.2 利用上述邻居个体数量及其恐慌量 q 根据式(3)更新 Q ;
 - step 5.3 如果 $Q \geq T$, 说明个体被感染, 情绪值更新为:
 - (a) 如果个体是保守型, 情绪值 $e_i = \text{rand}(0, 0.4]$;
 - (b) 如果个体是稳健型, 情绪值 $e_i = \text{rand}(0.4, 0.8]$;
 - (c) 如果个体是激进型, 情绪值 $e_i = \text{rand}(0.8, 1.0]$;
 - step 5.4 如果 $Q < T$, 则 $e_i = 0$ 。

上述方法能够有效计算个体情绪的变化。在一个无情绪个体周围, 如果有满足与其距离在 R 以内的有情绪个体, 此个体将接收这些个体的恐慌量 q 进行累加, 当累加量超过阈值时, 此个体就会有情绪。

5 情绪运动耦合模型

在人群动画中, 情绪通过驱动人群运动速度的变化来改变人群运动。本文结合 RVO 运动^[3]与 Roadmap 导航技术^[14]模拟复杂场景中的人群运动, 并与本文提出的情绪模型耦合, 实现人群运动中的情绪仿真。

在复杂场景中, 单纯的 RVO 运动不能指引个体到达目标, 还需要对整个场景的路径进行规划。本文使用 Roadmap 技术^[14]在预处理过程中构建使办公室场景连通的路径图, 并在所有可行路径中寻找一条最优路径。

在人群运动中, AV^i 表示个体的合理速度集合, 任意一个属于 AV^i 的 V_i' 都满足:

$$AV^i(V_i) = \{V_i' \mid \|V_i'\| < V_i^{\max} \cap \|V_i' - V_i\| < a^{\max} \Delta t\} \quad (4)$$

$$V_i^{\text{pref}}(e_i) = (1 + e_i)V_i^{\text{pref}} \quad (5)$$

$$\|V_i^{\text{pref}}(e_i)\| \leq V_i^{\max} \quad (6)$$

$$\text{penalty}_i(V_i') = \omega_i(1/tc_i'(V_i')) + \|V_i^{\text{pref}} - V_i'\| \quad (7)$$

其中, V_i' 是个体下一时刻的新速度, V_i 是个体当前的速度。情绪值 e_i 通过改变期望速度 V_i^{pref} 来改变人群的运动速度, 而下一时刻的新速度就是使式(7)误差值最小的速度。具体算法如算法 2 所示。

算法 2 情绪感染模型与人群运动耦合算法

输入: $e, v^{\max}, a^{\max}, \omega$

输出: v_{t+1}

- step 1 对所有个体的 $v^{\text{pref}}, \omega, v^{\max}$ 和 a^{\max} 进行初始化。
- step 2 在每个时间步 t 内对速度值 v 进行更新, 执行以下操作。
 - step 2.1 利用最大速度 v^{\max} 和最大加速度 a^{\max} 根据式(4)得到候选速度集合 AV ;
 - step 2.2 更新期望速度的大小 $\|v^{\text{pref}}\|$: 如果 $e_i = 0$, 期望速度不变; 如果 $e_i > 0$, 则利用情绪值 e_i 根据式(5)和式(6)更新 $\|v^{\text{pref}}\|$;
 - step 2.3 利用期望速度 v^{pref} 根据式(7)更新得到下一时刻的速度 v_{t+1} 。
- step 3 如果个体没有到达目标, 则继续更新情绪和速度, 否则个体停止运动。

6 实验与分析

本文实验采用的机器配置为奔腾双核处理器, 主频为 2.60GHz, 4GB 内存。实验结果由两个部分组成: 1) P-Durupinar 情绪感染模型效果以及对人群运动的影响; 2) 在人群运动平台^[19]之下的人群运动与渲染效果。在本次实验中, 令 $\mu_q = 0.5, \sigma_q^2 = 2, \mu_T = 2, \sigma_T^2 = 7$ 。

6.1 情绪感染

(1) 本文提出方案①、方案②分别模拟情绪感染现象。其中, 叉号代表感染情绪个体, 圆点代表未感染情绪个体。

①在空白场景中, 模拟 100 个个体向着目标运动。为方便观察, 令 1 个个体带有情绪, 观察运动过程中的情绪感染情况。图 2 给出了本方案的实验结果, 图 2(b) 中星状表示初始化中情绪个体的邻居。从图 2(c)、图 2(d) 中可以看出, 随着运动时间的增加, 叉号个体数目逐渐增加, 情绪出现了传染。

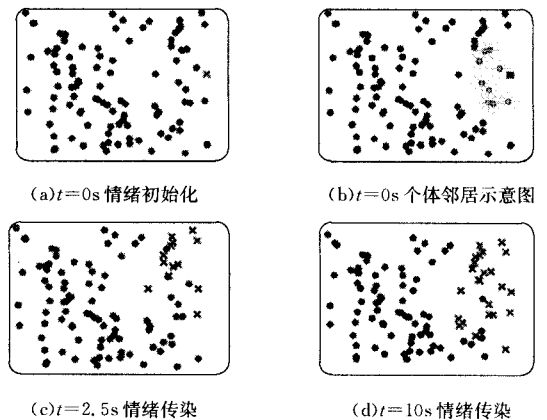


图 2 空白场景情绪感染

②在办公室场景内模拟 500 个个体向着目标运动。为了方便观察,令只有一个房间存在带有情绪的个体,图 3 给出了实验结果。

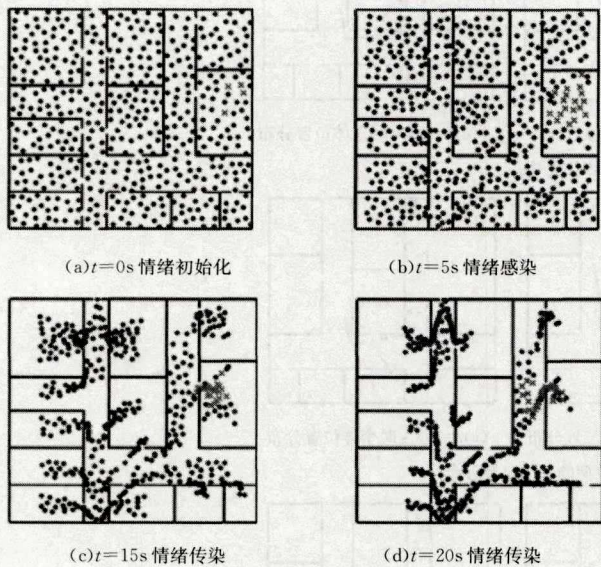


图 3 办公室场景个性化情绪感染

如图 3(a)所示,令某一房间初始化 4 个带有情绪的个体;在图(3)、图 3(b)中,房间内有情绪个体明显增加;在图 3(c)、图 3(d)中,随着时间的推移,房间内有情绪的个体离开房间运动到走廊并感染走廊上的个体。从图中可以看出,随着运动时间的增加,被感染的个体逐渐增多。

(2)为评价 P-Durupinar 情绪模型的仿真效果,本文提出方案③、方案④模拟不同情绪模型的人群运动效果。在本次实验中,令 $p_1=0.2, p_2=0.8$,使激进型、稳健型和保守型个体分别占总感染人数的 20%、60%和 20%。其中,用三角、叉号、十字和圆点分别表示极度、中度、轻度恐慌以及无情绪个体。为计算不同个体的运动速度,在实验中令 $a^{max}=1.0, \bar{\omega}=7.5, \tau^{pref}=1.0, \tau^{max}=7.0$ 。

③在空白场景中,分别模拟 100 个个体向着目标运动。对于相同个体,在图 4(2)和图 4(3)中的三角、叉号、十字个体聚集较早且出现了扎堆现象,而在图 4(1)中无明显变化。在图 4(3)中各种个体依次有序排列,但是在图 4(2)中,三角、叉号、十字个体位置无区别。实验表明 3 种运动结果不同,说明情绪能够改变个体的运动,基于个性化的情绪模型能更加真实地模拟人群运动。

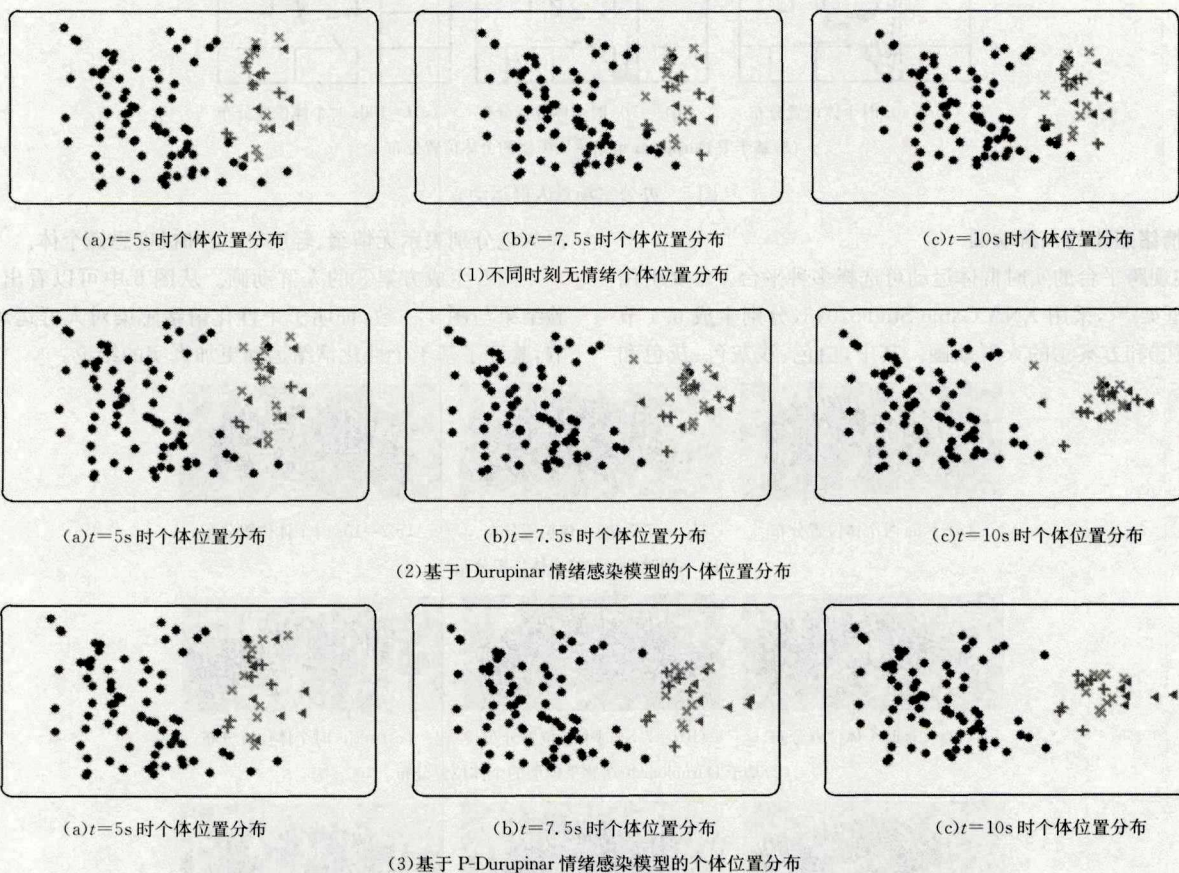


图 4 空白场景人群运动

④在办公室场景中,分别模拟 500 个个体向着出口运动,图 5 给出了实验结果。图 5(2)、图 5(3)在 $t=40s$ 时,三角、叉号、十字个体大部分已经运动到第二个走廊拐角处,此时图 5(1)中相同个体才运动到第一个走廊拐角处。在 $t=70s$ 时,图 5(2)、图 5(3)中个体即将运动到出口位置,而在图 5(1)中

个体刚运动到第二个拐角处。这说明有无情绪的运动是不一样的。图 5(3)中在 $t=100s$ 时,三角个体已经全部离开房间,而在图 5(2)中房间内还有三角个体未离开房间。实验结果验证了情绪等级划分的合理性,基于 P-Durupinar 的情绪模型运动更加贴近真实的人群运动。

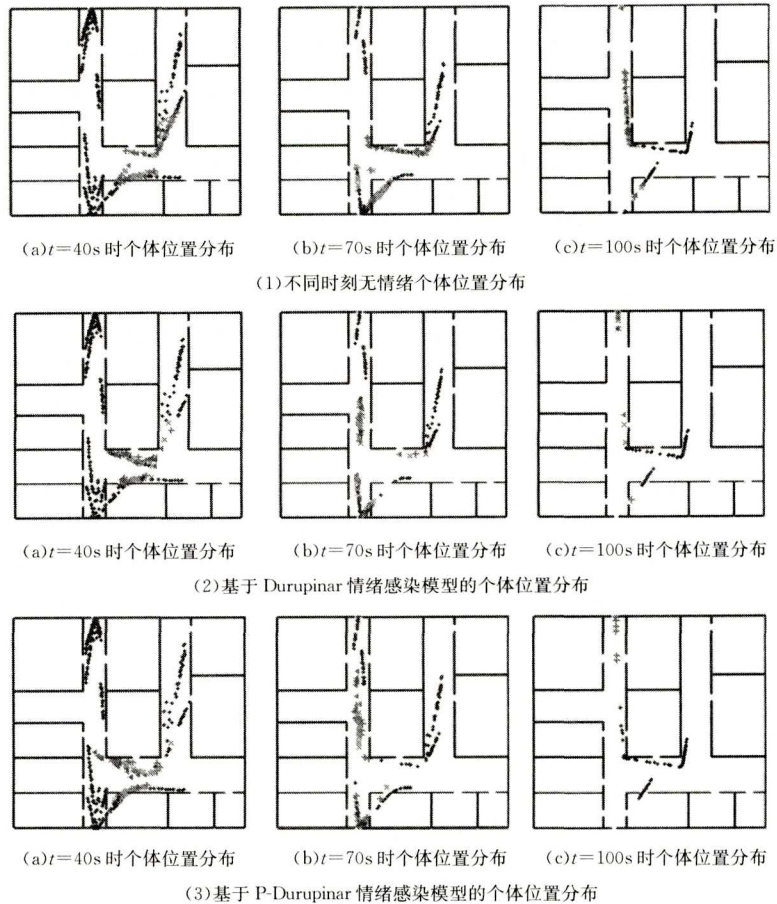


图5 办公室场景人群运动

6.2 情绪感染的人群动画

实现跨平台的实时群体运动可选择多种平台。本文引用 XNA 框架^[18],采用 XNA Game Studio2013,分别生成 6.1 节的方案③和方案④的人群动画。其中,白色、浅灰色、灰色和

深灰色分别表示无情绪、轻度、中度和极度恐慌个体。

图 6 生成方案③的人群动画。从图 6 中可以看出,其实验结果与图 4 一致,证明了个性化情绪感染对人群运动的影响,验证了基于个性化情绪运动更加真实的结论。

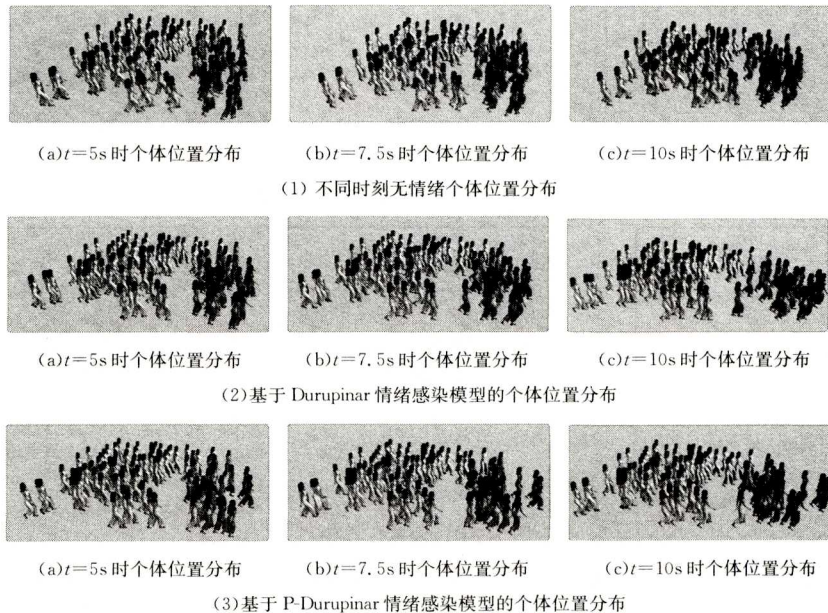


图6 空白场景人群动画模拟

本文还对某办公室建模,生成了 6.1 节方案④的人群动画,图 7 给出了实验结果。从图 7 中可以看出,本次实验结果

与方案④的实验结果一致,验证了情绪等级划分的合理性,基于 P-Durupinar 情绪模型运动更加贴近真实的人群运动。

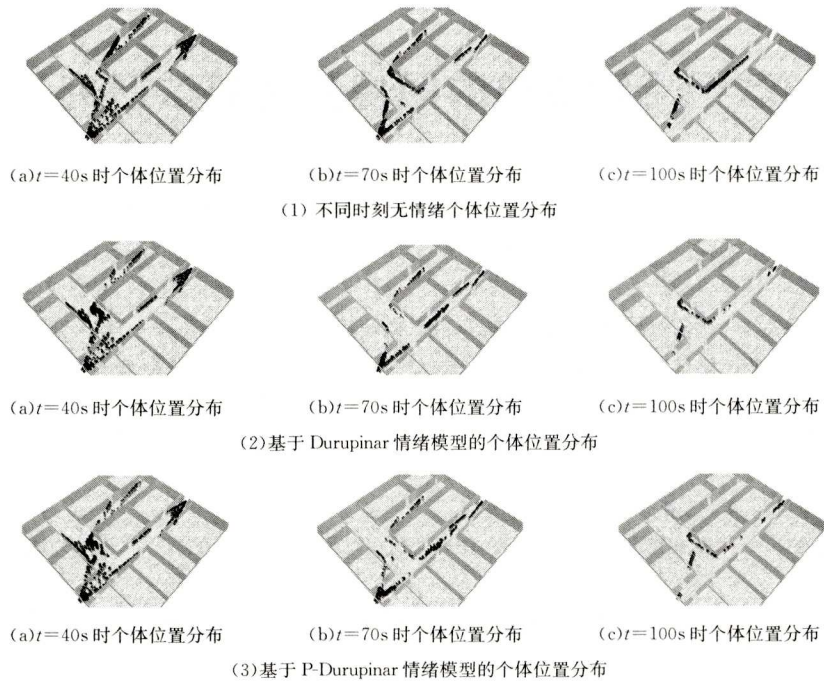


图 7 办公室场景人群动画模拟

为进一步验证方法的逼真性,分析了 2012 年唐山英才学校 地震疏散的监控录像^[19],并在三维仿真平台对其进行了仿真。



图 8 人群仿真与视频监控的效果对比

图 8(1)是监控视频截图,图 8(2)和图 8(3)分别是在无情绪感染和 P-Durupinar 情绪感染模型下进行人群运动仿真。通过对监控视频分析,一个楼层有 8 个教室,每个教室约 30 人。本次实验模拟视频中朝向前方角度、背朝角度的设置与视频相同。同时对视频中恐慌个体的行为进行深入分析,令无情绪、轻度恐慌、中度恐慌和极度恐慌个体分别占总人数的 5%,15%,60%和 20%。图 8(1)所示,在现实生活中个体具

有差异性,对恐慌的反应不尽相同,个体在运动过程中出现扎堆现象。在图 8(1)(b)中,同一教室个体,当较恐慌的个体疏散到楼出口时,无情绪个体才刚出教室门。图 8(3)中个体位置与图 8(1)基本相似,不同个体具有不同的情绪状态,对应不同的运动速度,在图 8(3)(a)和图 8(3)(b)中,个体出现扎堆现象,这是因为人群不同的感染程度导致运动速度不一

(下转第 316 页)

- ing Environmental Mapping by an Autonomous Robot[C]//Proc. Second Int'l. Workshop on Robotic Sensor Networks, Seattle, WA, 2015.
- [10] WEIZMAN L, ELDAR Y C, BASHAT D B. Compressed sensing for longitudinal MRI: An adaptive-weighted approach[J]. Medical physics, 2015, 42(9): 5195-5208.
- [11] NIARAKI A S, KIM K. Ontology based personalized route planning system using a multi-criteria decision making approach[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2250-2259.
- [12] WANG W W, WANG H Q, LU H L, et al. PET/CT Medical Image Fusion Algorithm Based on Compressive Sensing and NSCT-PCNN[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(2): 101-108. (in Chinese)
王文文, 王惠群, 陆惠玲, 等. 基于压缩感知和 NSCT-PCNN 的 PET/CT 医学图像融合算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(2): 101-108.

(上接第 311 页)

致, 后方运动快的会赶上前面运动慢的个体, 从而造成扎堆现象。白色个体没有情绪, 运动最慢, 在图 8(3)(c)中, 当白色个体运动到第一个门口时, 其他个体大都疏散完成。而图 8(2)中个体不具有情绪, 所有个体都以相近速度行走, 人员在运动过程中的分布比较均匀, 既不能体现个体恐慌时的状态, 又不能体现个体的差异性, 与真实运动差别较大。

结束语 本文提出了一种个性化情绪感染的人群动画生成方法。该方法将基于个性的 P-Durupinar 情绪感染模型与人群运动耦合。为了实现该方法, 本文构建了基于个性化情绪感染的人群运动框架: 建立个性化 P-Durupinar 情绪感染模型并将其与人群运动耦合, 通过真实感渲染得到预期人群动画效果。实验结果充分验证了个性对情绪的影响, 并且本文方法能够更加真实地模拟情绪感染下的人群运动。下一步工作是进一步完善情绪感染模型, 充分考虑分组等对情绪感染的影响, 增强人群运动行为的真实性。

参考文献

- [1] SHEN J J, WANG X J, CHAO Q W, et al. Fast and large-scale crowd authoring based on sample [J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 621-631. (in Chinese)
申晶晶, 王欣捷, 杪倩文, 等. 基于样本的大规模人群快速创作[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 621-631.
- [2] DURUPINAR F. From audiences to mobs: Crowd simulation with psychological factors [D]. Bilkent University, 2010.
- [3] PATIL S, VAN DEN BERG J, CURTIS S, et al. Directing crowd simulations using navigation fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(2): 244-254.
- [4] TSAI J, BOWRING E, MARSELLA S, et al. Empirical evaluation of computational fear contagion model crowd dispersions [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2013, 27(2): 200-217.
- [5] DODDS P S, WATTS D J. A generalized model of social and biological contagion [J]. Journal of Theoretical Biology, 2005, 232(4): 587-604.
- [6] DURUPINAR F, PELECHANO N, ALLBECK J M, et al. How the ocean personality model affects the perception of crowds [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011(3): 22-31.
- [7] GUY S J, KIM S, LIN M C, et al. Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory[C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH Eurographics Symposium on Computer Animation. ACM, 2011: 43-52.
- [8] KIM M, HYUN K, KIM J, et al. Synchronized multi-character motion editing [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2009, 28(3): 79.
- [9] LIU Z, JIN W, HUANG P, et al. An emotion contagion simulation model for crowd events [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(12): 2578-2589. (in Chinese)
刘箴, 金炜, 黄鹏, 等. 人群拥挤事件中的一种情绪感染仿真模型研究[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(12): 2578-2589.
- [10] LIU Z. Personality Model of Virtual Character [J]. Computer Science, 2008, 35(12): 203-206. (in Chinese)
刘箴. 智能体的一种个性模型[J]. 计算机科学, 2008, 35(12): 203-206.
- [11] JIANG H, XU W, MAO T, et al. Continuum crowd simulation in complex environments[J]. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 537-544.
- [12] WANG Z Q, MAO T L, JIANG H, et al. Guarder: virtual drilling system for crowd evacuation under emergency scheme [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(6): 969-978. (in Chinese)
王兆其, 毛天露, 蒋浩, 等. 人群疏散虚拟现实模拟系统——Guarder[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(6): 969-978.
- [13] ZHOU M X, CHENG K, WANG Z X. Improved ant colony algorithm with planning of dynamic path [J]. Computer Science, 2013, 40(1): 314-316. (in Chinese)
周明秀, 程科, 汪正霞. 动态路径规划中的改进蚁群算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 314-316.
- [14] BAYAZIT O B, LIEN J M, AMATO N M. Better Group Behaviors in Complex Environments using Global[J]. Artificial Life, 2003, 8: 362.
- [15] VAN D B J, LIN M, MANOCHA D. Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2008: 1928-1935.
- [16] JUNG C G, et al. Psychology and Alchemy[M]. Princeton University Press, 1980.
- [17] YU L P, LIU Z, LIU T T, et al. Sampling speed based emotion contagion model for panic crowd [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(10): 3172-3178. (in Chinese)
于力鹏, 刘箴, 刘婷婷, 等. 一种基于速度采样的恐慌人群情绪感染模型[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(10): 3172-3178.
- [18] SUN Y C, LIU H, ZHANG G J. Cross platform system for real-time crowd simulation [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(4): 863-867. (in Chinese)
孙云晨, 刘弘, 张桂娟. 支持跨平台的实时人群运动仿真系统[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(4): 863-867.
- [19] Ember121. Students evacuate school during earthquake[OL]. <https://www.youtube.com/watch?v=4M45p0pnjs8>.