

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2013 **3**  
Vol.18 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

## 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 3 月 第 18 卷 第 3 期(总第 203 期)

## 目次

## 图像处理和编码

沿边局部灰度差分椒盐噪声滤波 ..... 孔勇奇, 潘志庚(249)

## 图像分析和识别

核稀疏保留投影及在步态识别中的应用 ..... 王科俊, 阎涛, 吕卓纹, 唐墨(257)

局部 Gist 特征匹配核的场景分类 ..... 杨昭, 高隼, 谢昭, 吴克伟(264)

## 图像理解和计算机视觉

条件随机场模型的场景描述 ..... 赵龙, 郭立, 谢锦生(271)

基于  $L_1$  与空间点分类的 3 维场景重建 ..... 李静, 杨宜民, 付根平, 陈建平(277)

稀疏表示的 Lucas-Kanade 目标跟踪 ..... 徐如意, 陈靛影(283)

## 医学图像处理

管状特性和主动轮廓的 3 维血管自动提取 ..... 尚岩峰, 汪辉, 汪宁, 陈杰, 姚丽萍, 孙琨(290)

## “第 17 届 CAD&amp;CG 学术会议”专栏

多步攻击的规则树检测及可视化 ..... 胡亮, 赵剑明, 解男男, 努尔布力(299)

显著性边缘引导下的图像抽象化 ..... 王勋, 李红, 刘春晓, 严彩萍(305)

稀疏表达的运动数据压缩 ..... 齐天, 肖俊, 庄越挺(311)

基于语义的用户关注度计算 ..... 陈蕾英, 陈佳舟, 潘斌, 彭群生(318)

九宫格空间框架的图书图像检索 ..... 李宗民, 唐志辉(325)

光学相干层析视网膜体数据的 3 维分割 ..... 樊鲁杰, 孙延奎, 张田, 田小林(330)

混合软影绘制算法 ..... 刘浏, 周炜, 李华(336)

基于场的人群运动仿真 ..... 赵欣欣, 张勇, 孔德慧, 尹宝才(344)

利用大位移视图的自动可信图像修补 ..... 刘春晓, 金剑秋, 彭群生(351)

第八届国际数字地球会议征稿通知 ..... (358)

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 3 March 2013

## Contents

### Image Processing and Coding

Salt and pepper noise filtering algorithm based on local border gray-scale differences ..... Kong Yongqi, Pan Zhigeng(249)

### Image Analysis and Recognition

Kernel sparsity preserving projections and its application to gait recognition ..... Wang Kejun, Yan Tao, Lv Zhuowen, Tang Mo(257)

Scene categorization of local Gist feature match kernel ..... Yang Zhao, Gao Jun, Xie Zhao, Wu Kewei(264)

### Image Understanding and Computer Vision

Scene description based on the conditional random fields model ..... Zhao Long, Guo Li, Xie Jinsheng(271)

Three dimensional scene reconstruction based on  $L_1$  and scene point classification .....  
..... Li Jing, Yang Yimin, Fu Genping Chen Jianping(277)

Lucas-Kanade tracking based on sparse representation ..... Xu Ruyi, Chen Jingying(283)

### Medical Image Processing

Three dimensional vessel extraction model based on tubular characters and active contour model  
..... Shang Yanfeng, Wang Hui, Wang Ning, Chen Jie, Yao Liping, Sun Kun(290)

### Issum of the CAD&CG'2012

Multi-step attacks detected by rules tree and visualization ..... Hu Liang, Zhao Jianming, Xie Nannan, Nurbol(299)

Salient edge guided image abstraction optimization ..... Wang Xun, Li Hong, Liu Chunxiao, Yan Caiping(305)

Motion data compression using sparse representation ..... Qi Tian, Xiao Jun, Zhuang Yueting(311)

Semantic-based user interests computation ..... Chen Leiying, Chen Jiazhou, Pan Bin, Peng Qunsheng(318)

Books image retrieval based on grid space frame ..... Li Zongmin, Tang Zhihui(325)

Three dimensional segmentation to detect retinal boundary surfaces from OCT volume data  
..... Fan Lujie, Sun Yankui, Zhang Tian, Tian Xiaolin(330)

Hybrid soft shadow rendering method ..... Liu Liu, Zhou Wei, Li Hua(336)

Field-based crowd simulation ..... Zhao Xinxin, Zhang Yong, Kong Dehui, Yin Baocai(344)

Automatic and accurate image completion from a large displacement view ..... Liu Chunxiao, Jin Jianqiu, Peng Qunsheng(351)

中图法分类号: TP37 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)03-0344-07

论文引用格式: 赵欣欣, 张勇, 孔德慧, 尹宝才. 基于场的人群运动仿真[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(3): 344-350.

## 基于场的人群运动仿真

赵欣欣, 张勇, 孔德慧, 尹宝才

北京工业大学计算机学院多媒体与智能软件技术北京市重点实验室, 北京 100124

**摘要:** 人群仿真目前在工业、建筑、交通等多种领域中应用广泛。实现复杂场景中的人群运动实时仿真, 效率是亟待解决的关键性问题, 而提高仿真效率所必须面临的挑战主要有人群的渲染、位置及状态的实时更新和碰撞检测。提出一种基于场的方法来实现人群运动的实时仿真, 通过构建导航场和密度场引导人群运动。导航场能够引导人群按最优可行路径到达其目标位置; 而密度场通过对人群运动速度的影响, 再与基于 GPU 的碰撞检测方法结合, 有效地避免了人群碰撞。应用基于场的方法, 搭建了人群运动实时仿真系统, 在复杂的场馆中对几千人规模的人群进行了实验, 成功地对人群进行疏散。实验结果表明, 本文方法能够获得良好的渲染效果和仿真效率。

**关键词:** 人群运动仿真; 路径规划; 碰撞检测; 人群运动; 密度场

## Field-based crowd simulation

Zhao Xinxin, Zhang Yong, Kong Dehui, Yin Baocai

Beijing Key Laboratory of Multimedia and Intelligent Software Technology, Department of Computer Science and Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract:** Crowd simulation has been widely used in industry, architecture, transportation, and many other fields. To implement real-time crowd simulation in complex environments, efficiency is a pivotal problem to resolve. We meet a lot of challenges, such as rendering of large crowds, the update of crowd's locations and states, as well as collision avoidance. We propose a field-based approach to implement real-time crowd simulation. This approach guides the crowd movements by constructing a navigation field and a density field. The navigation field can make the crowd choose the optimal path to reach the desired destinations. The density field can affect the velocity of the crowd to help avoid collisions, combined with a GPU-based collision avoidance method. Using our approach, we have constructed a real-time crowd simulation system and tested the performance in a large venue with thousands of agents. We succeed in simulating the evacuation of crowds with excellent rendering and high efficiency.

**Key words:** crowd simulation; path planning; collision avoidance; crowd motion; density field

## 0 引言

人群运动仿真是虚拟现实的一个重要研究方向。近几十年来, 虚拟人群运动仿真在工业、娱乐、

旅游开发、广告设计、建筑及交通等多种领域前景广阔。基于现实的需要和技术的发展, 模拟实时人群运动显得更为重要。例如, 在一些大规模人群聚集的场所, 当突发紧急事件发生的时候, 人群很容易产生混乱和拥挤, 甚至出现人员伤亡, 如果能模拟出在

收稿日期: 2012-08-08; 修回日期: 2012-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U0935004, 60825203); 北京市属市管高等学校人才强教深化计划创新团队资助(PHR(IHLB)); 北京工业大学博士科研启动基金项目(00700054R1767)

第一作者简介: 赵欣欣(1988—), 女, 现为北京工业大学计算机技术工程硕士专业硕士研究生, 主要研究方向为虚拟现实。E-mail: zhiying0606@163.com

复杂建筑中将大规模人群进行安全疏散的情景,对紧急情况下的危急预案具有指导意义;在游戏制作过程中,通过虚拟人群构造出玩家的操作对象,并赋予虚拟人一定的行为,可增加游戏的沉浸感和趣味性。

人群实时运动仿真的主要研究目标是为处在复杂场景中的人群快速计算出自然、平滑且符合实际的运动路径,为他们提供各种各样接近真实人物的行为状态,得到逼真的仿真效果,同时又要保证实时仿真效率。虽然许多学者都致力于复杂虚拟环境中真实地模拟人群运动的研究,但目前仍存在一定的挑战,其挑战就在于,在进行人群运动仿真时不仅要考虑人群的渲染、运动路径的约束,还要考虑动态因素的影响下人群运动的实时变化。这些挑战也决定了所要研究的关键技术,主要有人群建模、路径规划、碰撞检测等。为让研究目标更好地得以实现,研究人员就要不断更新优化这几项关键技术。

许多研究者在群体运动方面进行了大量尝试和探索,在一些应用领域已经取得了显著的成果。目前,已经有许多种群体行为模型产生。Reynolds<sup>[1]</sup>提出了群集行为模型,用 boids 表示群体,并对个体建立有限状态机;随后又进一步拓展了群聚模型<sup>[2]</sup>,提出用于避碰的导航行为,以及通过层次建模的方法建立自治个体的运动行为模型;Xu 等人又在 Reynolds 的“self-animation”概念基础上发展了更为复杂的基于规则的行为模型<sup>[3]</sup>。Musse 则提出了分层行为模型<sup>[4]</sup>,这个模型把群体分成群、组、个体3个不同的层次,对每一层次进行不同的行为建模,最终模拟出复杂的群体行为。应用 Navier-Stokes (N-S) 公式进行建模被称作流体系统模型,Helbing<sup>[5]</sup>基于前人的工作,应用 N-S 方程做出了行人流与粒子流的对比;Chenney<sup>[6]</sup>也论证了人群的避免拥挤可以通过自由发散的流来得到。粒子系统这一概念最早被 Reeves<sup>[7]</sup>引入计算机图形学领域;而后Bouvier<sup>[8]</sup>提出了应用粒子系统来研究模拟人群运动,人群基于牛顿力学、人群运动目标及决策进行运动。还有许多基于 graph 或 road-map 方法进行全局导航的群体行为模型。Kavraki<sup>[9]</sup>提出了概率地图 (PRM) 方法用于人群个体运动的规划,而后又出现了自适应性的 road-map 方法用于在动态、复杂场景中进行实时人群行为控制<sup>[10]</sup>;Pétré<sup>[11]</sup>则提出应用导航图方法对人群运动进行实时控制。

场的概念在人群运动的研究中也多次被提出。Chenney<sup>[6]</sup>应用流贴图设计了速度场。Hughes<sup>[12]</sup>则

提出了势场和人群密度场的概念,通过势函数来引导人群运动,应用密度场控制人群运动速度;而后Treuille<sup>[13]</sup>又在 Hughes 的基础上对密度场的构建及密度如何影响人群运动速度等方面的工作进行了改进;Jin<sup>[14]</sup>提出了基于径向基函数的向量场方法;最近,Sachin<sup>[15]</sup>提出了导航场的概念,应用导航场来对人群运动路径进行规划,再利用局部碰撞检测方法,实现人群运动仿真。

现有的群体行为模型有些是以无差别个体构成的群体作为研究对象,而有些则以单独的个体作为研究对象进行模拟。前一种的特点是忽视个体个性,虽然这种方法对硬件条件要求较低,但往往真实感难以达到要求;而后一种虽然真实性增强,但是对较多人数进行实时更新时,使得效率很低。所以,力求探索一种使效率和真实感都能满足要求的方法。

在 Sachin 和 Treuille 工作的基础上,采用更为细致的方法对场景进行离散化处理,并以此为基础创建了导航场,对人群的疏散路径进行规划,得到更为准确、平滑的运动路径;采用改进的密度映射规则建立密度场对人群速度进行控制,再应用 GPU 实现简单的碰撞检测,最终有效地避免了人群碰撞。

## 1 框架说明及向导图

### 1.1 框架说明

提出的人群运动实时仿真方法的大体框架如图1所示,主要分为3个部分:1)以具有同一目标位置的一组人为单位进行路径规划;2)建立密度场对所有人的速度进行有效控制;3)以每个人为单位进行简单的动态碰撞检测。除此之外,预处理部分的主要工作是建立向导图。向导图是用来描述场景信息以及用户指定的大体运动方向和每组人群的目标位置,场景信息主要包括场景中的静态障碍物及可运动区域,而提前规划的运动方向和每组人群的目标位置则是由用户根据需求在交互时输入并记录下的,一旦用户输入发生变化,向导图信息就要更新。向导图所提供的信息能够指导导航场的生成,获得每组人群的最优路径。从这里也能看出,导航场是群组级别的,也就是每组人都拥有自己的导航场,而密度场是对于整个人群而言。

在图1中,密度场和碰撞检测都是要在每个仿

真步骤中进行实时更新的,而导航场则是在向导图(即用户输入发生变化)发生变化时重新生成。另外,由于导航场是基于群组的,所以应用改进的 A-star( $A^*$ )算法进行场的扩展,效率更高,后文将会对此进行详细阐述。

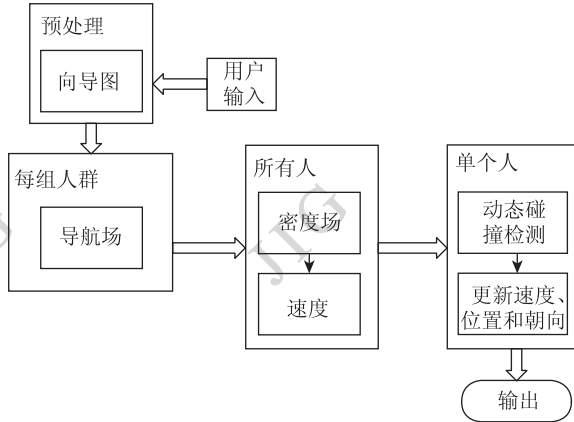


图 1 人群实时仿真框架图

Fig. 1 The architecture of crowd simulation

## 1.2 向导图

为设计合适的向导图,需先将场景离散化。首先,根据 2 维平面采样图可对整个场景进行均匀网格化(规定其为四邻域网格)处理,记录每个网格的中心点坐标,同时读取每个网格中心的场景深度值并记录下来(通过 2 维场景的深度图读取)。而后,对环境图进行颜色标注,把障碍物和可运动区域中的不同运动方向用特定的颜色标注出来。对于复杂的场景来说,均匀网格化后的每个网格中不一定全部是可运动区域或障碍物,可能二者兼有,若想准确表示出场景信息,就需要将网格维度提高,但这样会对导航场的生成效率造成影响,因此对均匀网格的信息进行进一步细化处理来生成向导图。

每个网格中可能包含场景中的障碍物及可运动区域,要对其进行细致划分。以图 2 为例,对于网格 O,除记录其中心坐标外,还要记录其四分之一网格的 4 个中心点 A、B、C、D,通过 2 维离散图得到 5 个点所标记的颜色来确定此网格属于何种类型,在此规定了以下几种类型的网格: All-F、All-O、Up\_F\_Down\_O、Up\_O\_Down\_F、Left\_F\_Right-O、Left\_O\_Right\_F, 其中 F 代表可运动区域, O 代表障碍物。并且 F 又因其前面标注的运动方向,分为上下左右 4 个方向,表示为 FU, FD, FL 和 FR。

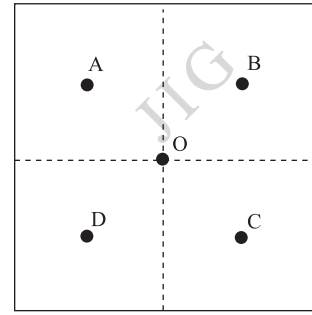
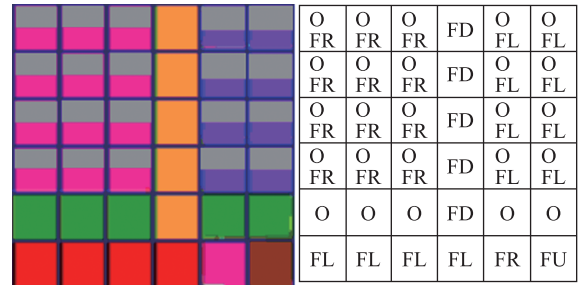


图 2 网格 O 的细化处理

Fig. 2 The refined processing of grid O

如图 3(a) 所示,粉色表示的可运动方向为东,而橙色表示的可运动方向为南,绿色或其他未指定的颜色则表示障碍物;图 3(b) 为根据图 3(a) 得到的方向示意图,表示障碍物及可运动区域的信息,用向量表达可运动区域的不同方向。



(a) 颜色标注图

(b) 方向示意图

图 3 网格处理后效果图

Fig. 3 The effect drawing after processing

通过以上处理可创建出场景的向导图,其中所记录的信息主要有网格 2 维坐标、深度及场景不同区域的运动方向和障碍物。

## 2 导航场

向导图虽然在一定程度上可以指导人群进行运动,但它只表明用户期望人群运动的大体方向趋势,而且在具有不同目标位置的人群中,只靠向导图中指定的方向,可能会造成一些错误,从而无法保证每组人群都到达正确的目标位置,因此需要计算用于指明人群准确运动路径的导航场。导航场的生成主要分为场的扩展及具体运动方向计算两个部分。

### 2.1 基于 $A^*$ 算法的导航场

通过  $A^*$  算法对每组具有相同起止网格的人群进行最优路径选择,这也是本文与 Sachin 所提方法的一大不同点。在所有组人群的最优路径计算完成后,将

每组人群的导航场分别存储,用以驱动人群运动。

A\*算法是一种静态路网中求解最短路径的最有效的方法,它是一种启发式、有序搜索。A\*算法的估价函数可表示为

$$f^*(n) = g^*(n) + h^*(n)$$

式中,  $f^*(n)$  是估价函数,  $g^*(n)$  是起点到  $n$  节点的最短路径值,  $h^*(n)$  是  $n$  到目标的最短路径的启发值。所选的代价函数是已被广泛使用的曼哈顿距离,但由于场馆模型非常复杂,为使人群能够准确地寻径,在 A\* 算法的代价函数中加入了深度因素。网络的深度用  $h(n)$  表示,再为相邻两个网络的深度差设定一个最大阈值  $H_{\max}$ ,深度差大于这个阈值的两个网络是不能连通的,代价函数为

$$g(n, n') = \begin{cases} |x - x'| + |y - y'| & \Delta h(n, n') < H_{\max} \\ \infty & \Delta h(n, n') \geq H_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta h(n, n') = \text{abs}(h(n) - h(n'))$ , 且  $n$  与  $n'$  代表相邻的两个节点(网格)。

以图4为例,人群当前所在网格为  $C$  ( $A$ 、 $D$  均为一楼地面,  $B$ 、 $C$  均为二楼楼梯), 下一步可选网格为  $A$ 、 $B$ 、 $D$ , 若此组人群终点为  $T$ , 则根据 A\* 算法可得, 下一步应走  $D$ , 但根据提出的代价函数,  $C$  网格内的人不能通向  $D$ , 因为深度差  $\Delta h(C, D) > H_{\max}$ , 这正符合真实疏散情况, 人不能从二楼直接跳到一楼, 所以  $C$  网格最终通向的是  $B$ 。

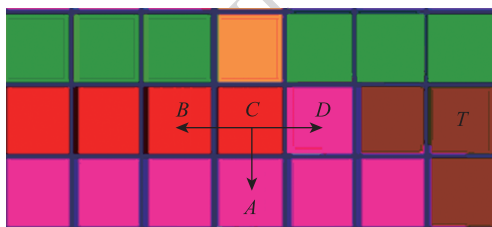


图4 引入深度的 A\* 算法

Fig. 4 A\* algorithm introducing depth

根据 A\* 算法确实可得到正确的路径, 然而从图中可以看出其所得路径在拐角处均为直角, 影响真实感效果, 为使路径更加平滑、真实, 在计算每个网格的具体方向时, 引入了 Sachin 方法。

## 2.2 个人运动方向的计算

为使运动路径更加平滑, 每个人在当前网格中都要按最优方向进行运动。以图5为例进行说明, 人群当前所在网格为  $O$ , 根据 A\* 算法下一步可选网格为  $A$  和  $B$ , 假设  $OA$  与  $OB$  的长度为 1,  $P$  为  $AB$  上

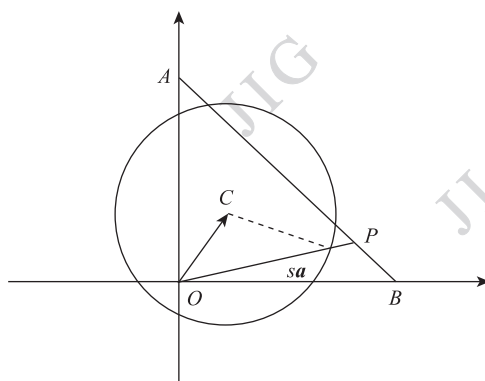


图5 导航场具体方向的计算

Fig. 5 The computation of directions in navigation field

的点, 且位置为  $(\alpha, 1 - \alpha)$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $OP$  是最优路径,  $\vec{OC}$  的方向为向导图指定的方向, 记作  $G(O)$ , 规定  $G(O) \leq 1$ , 并有

$$\|sa - G(O)\| = 1 \quad (2)$$

式中,  $a$  为运动方向,  $a = \frac{(\alpha, 1 - \alpha)}{\|(\alpha, 1 - \alpha)\|}$ 。解方程式(2)可得

$$s(O, a) = a \cdot G(O) + \sqrt{(a \cdot G(O))^2 - G(O) \cdot G(O) + 1} \quad (3)$$

为求得人群运动的最佳方向, 引入新的代价函数

$$C(O) = (1 - \alpha)C(A) + \alpha C(B) + \frac{\|(\alpha, 1 - \alpha)\|}{s(O, a)} \quad (4)$$

令代价函数  $C(O)$  对  $\alpha$  进行求导, 导数为零时, 代价函数可取得最小值, 此时得到的  $\alpha$  计算出的方向  $a$  即为当前网格中的人运动的最佳方向, 再通过式(3)得到的速度即为人当前的运动速度。

结合 A\* 算法本身的优势及最佳方向的计算方法, 可以高效地得到准确平滑的人群运动路径。

## 3 密度场

在计算导航场的过程中, 相应网格中的人群运动速度也可以得到, 然而这并不是人群的最终运动速度。当不同组人相遇时, 可能会造成某区域网格人群密度迅速增大, 会发生碰撞、交叉的现象。为避免碰撞的发生, 引入了密度场概念, 通过密度场进一步影响人群速度进而避免人群在运动过程中发生碰撞。

假定每个人都对其所在网格及邻接网格有密度

贡献,设计一种密度映射规则,将人的密度转换为相应的网格密度,计算出整个密度场后,按照密度的大小对人群速度加以控制。

具体映射规则如下,以图 6 为例。假定每个网格的长度为 1,  $O$  为网格  $C$  中的一个人的位置,  $O$  在  $C$  网格的右上角四分之一部分,  $O$  与  $C$  在横轴上的距离为  $\Delta x$ , 在纵轴上的距离为  $\Delta y$ 。由于已经通过导航场得知每个人的运动方向,在进行密度映射的时候,也引入了运动方向这个因素。  $N(O)$  是当前人所在网格  $C$  通过导航场得到的运动方向,  $\vec{OA}$  是当前人的位置  $O$  与网格  $A$  的中心点所形成的向量。此时,规定  $O$  只对其本身所在网格  $C$  与其周围 3 个网格(网格  $A$ 、 $B$ 、 $D$ )有密度贡献,对其周围其他 4 个网格没有密度贡献,  $O$  点人对网格的密度贡献为

$$\begin{aligned}\rho_A &= \omega_A \min(1 - \Delta x, \Delta y)^\lambda \\ \rho_B &= \omega_B \min(\Delta x, \Delta y)^\lambda \\ \rho_C &= \min(1 - \Delta x, 1 - \Delta y)^\lambda \\ \rho_D &= \omega_D \min(\Delta x, 1 - \Delta y)^\lambda \\ \omega &= \begin{cases} \cos \theta & \theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}\end{aligned}$$

$\lambda$  是衰减系数,决定密度的衰减速度;  $\omega$  是与运动方向有关的密度衰减系数,不对当前网格起作用,只对其他 3 个网格起作用,且对每个网格大小不同;  $\theta$  则是  $N(O)$  与  $\vec{OA}$  所成的夹角。

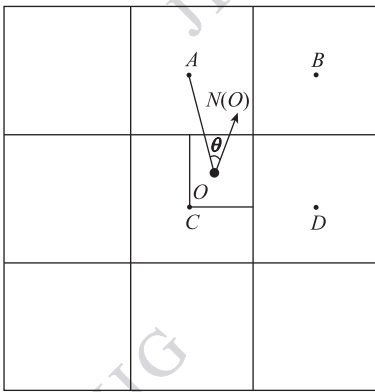


图 6 密度场映射规则

Fig. 6 The mapping rules of density field

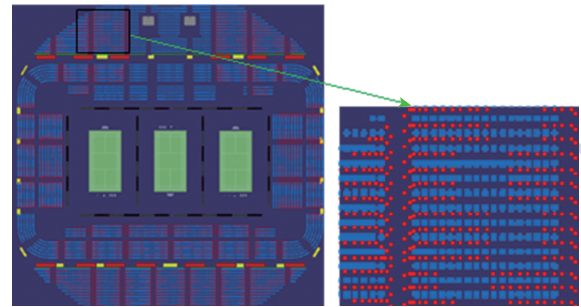
把每个对当前网格密度有贡献的人的密度相加,即得到当前网格的密度  $\rho$ , 对所有网格都求出其密度,就得到了密度场。同时根据导航场已计算出的速度,得到每个人的当前运动速度  $v_i$ , 则当前网格的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\sum_i \rho_i v_i}{\rho}$$

在人群密度很小的区域,人群可以按照自己能行走的最大速度进行疏散,这个最大速度可根据每个人的不同年龄、性别等因素进行指定;在人群密度很大的区域,则要以所在网格及周边网格的最小平均速度运动,这样可以有效避免人群碰撞的发生。

这里,系统要对其密度场及最终运动速度进行实时更新,通过每次更新的速度计算出人新的位置和朝向。通过引入密度场控制人群运动速度,可以有效地避免人群碰撞的发生,但是并不能完全保证人与人之间不交叉,所以仍要对其进行简单的碰撞检测。

设定每个人占有一定的个人空间,此空间其他人不可到达,并应用 GPU 的 Render-to-texture 方法,也就是将人群的空间信息保存到一个实时更新的碰撞检测图中,如图 7 所示,每个红色方块代表一个人的个人空间,通过一个相机对此碰撞检测图实时监控,并将不断更新的内容存入缓冲区中,每次更新人群位置之前,从缓冲区中读取相关位置信息,对人群能否进行下一步运动进行判定。



(a) 全局图

(b) 局部放大图

图 7 人群碰撞检测图

Fig. 7 Collision detection map

## 4 实验结果

应用建立的人群运动仿真系统进行实验,主要模拟场馆中人群的疏散过程。应用场景是 2008 年奥运会羽毛球馆,人群规模达到几千人。开发语言为 C++, 实验所用硬件配置为 3.0 GHz AMD Athlon 的处理器, NVIDIA GeForce GTS 250 的显卡和 4 GB 的内存。人群的绘制并不是研究重点,但值得一提的是,为解决几何绘制方法效率低下的问题,人

群绘制利用 GPU 中的几何着色器,采用 Impostor 人群绘制方法<sup>[16]</sup>,提高了人群渲染效率。

本场馆中地形十分复杂,有高低不同的座位、楼梯和多个出口。为充分利用场馆中所有出口,需将人群合理分组,使每组人群根据所在位置选择一条最优路径到达正确的出口,实现疏散。图 8 是 3 维场馆中所有观众朝各自制定的出口进行疏散的场景,也就是每组人群按照自己的导航场给出的路径信息进行疏散。图 9 展现了人群在疏散过程中,碰到楼梯时沿着楼梯进行疏散,而没有从楼梯上直接跳下来,这表明了本文改进的 A\* 算法中提出的引入场景深度因素的代价函数的有效性。

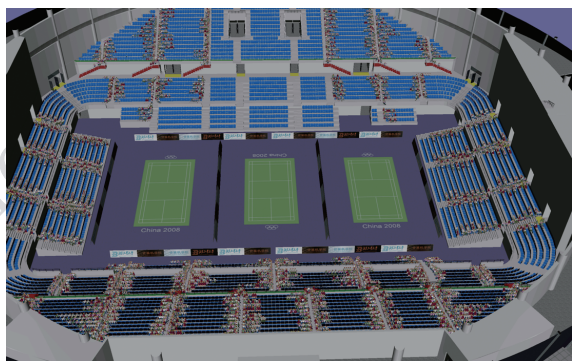


图 8 场馆人群疏散的整体效果图

Fig. 8 The whole view of crowd evacuation

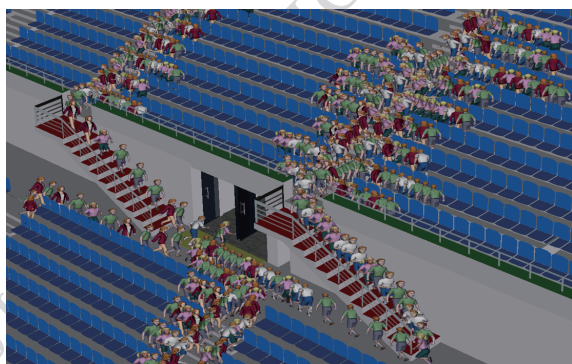


图 9 人群沿狭窄楼梯进行疏散的效果图

Fig. 9 The view of crowd moving along narrow stairs

人群仿真系统的导航场只有向导图或用户输入发生变化才需重新生成,所以它不影响实时渲染效率,而密度场是实时更新的,它的维度影响实时效率(实验中密度场维数与网格维数相同)。用每帧所用的仿真时间来衡量系统的实时渲染效率,实验结果如图 10 所示,从图 10 可以看出 RVO 和 Helbing

的碰撞检测方法,其渲染效率是与人数呈线性关系的,而本文方法(Field-based)则不然。

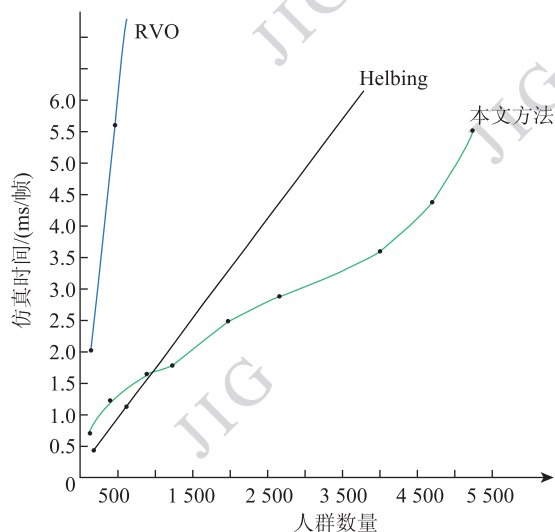


图 10 3 种方法的人群数量与帧速关系曲线图

Fig. 10 The graph between crowd number and frame rate of these three methods

影响本文方法实时渲染效率的因素是密度场的维数和人群的数量。经分析可知,实时渲染的复杂度是  $A \times N \times \log mn$ ,  $m, n$  为密度场的维数,如果密度场的维数不变,可以把其看做常数,  $N$  表示人群数量。每帧仿真时间会随着人群数量的增长而增加,而本文方法则是在一定范围内降低了每帧所需仿真时间的增长速度(即图 10 所示的 RVO 与 Helbing 两种方法的增长速度更快),这样实时渲染效率就得到了一定程度的提升。

## 5 结 论

提出一种基于场的人群运动仿真方法,应用场引导人群的运动。通过更加细致地场景离散化方法创建向导图,再根据向导图中的信息创建导航场。在导航场的扩展过程中,对 A\* 算法进行改进,并结合 Sachin 计算具体运动方向的方法,得到了准确、平滑的运动路径。改进密度映射规则,创建影响人群运动速度的密度场,又应用 GPU 的 Render-to-texture 方法实现简单的碰撞检测,最终形成了自然、真实的避碰效果。

然而,本文方法仍有不足之处。首先,向导图的创建方法可进行改进,需要设计更加严密的标注方式。其次,可以尝试设计一种新的密度映射规则,对其运动方向也产生一定的影响。比如当某个人向密

度更大的区域运动时,当检测到附近密度较小的区域,可以即时改变方向,会得到更加真实的避碰效果。另外,还可以增加人群的运动状态和行为,增强真实感。在效率提升方面,也可以进行更深入的探索。本文方法中存在许多场,这些场可以用2维纹理的方式进行存储,因此本文方法可以利用GPU的硬件优势,优化人群仿真系统,这也是未来的另一个研究重点。

### 参考文献 (References)

- [1] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model [C]//Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Anaheim, California, USA: ACM, 1987:25-34.
- [2] Reynolds C W. Steering behaviors for autonomous characters [C]//Proceedings of Game Developers Conference. San Jose, California, USA: Miller Freeman Game Group, 1999:763-782.
- [3] Tu X Y, Terzopoulos D. Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior [C]//Proceedings of ACM Siggraph in 1994. Orlando, Florida, USA: ACM, 1994: 43-50.
- [4] Musse S R, Thalmann D. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(2):152-164.
- [5] Helbing D, Molnar P, Farkas I, et al. Self-organizing pedestrian movement [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(3):361-383.
- [6] Chenney S. Flowtiles [C]//The 2004 Eurographics Symposium on Computer Animation. Grenoble, Isère, France: Eurographics Association, 2004:233-242.
- [7] Reeves W T. Particle system: a technique for modeling a class of fuzzy object [J]. Computer Graphics, 1983, 17(3):359-376.
- [8] Bouvier E, Cohen E, Najman L. From crowd simulation to airbag deployment: particle systems, a new paradigm of simulation [J]. Journal of Electronic Imaging, 1997, 6(1): 94-107.
- [9] Kavraki L, Svestka P, Latombe J C, et al. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces [J] IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(4):566-580.
- [10] Sud R, Gayle E, Anderson S, et al. Real-time navigation of independent agents using adaptive roadmaps [C]//The ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Newport Beach, California, USA: ACM, 2007: 99-106.
- [11] Pettré J, Ciechomski P H, Maïm J, et al. Real-time navigating crowds: scalable simulation and rendering [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2006, 17(3-4): 445-455.
- [12] Hughes R L. The flow of human crowds [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35(35): 169-182.
- [13] Treuille A, Cooper S, Popovic Z. Continuum crowds [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3):1160-1168.
- [14] Jin X G, Xu J Y, Wang C C L, et al. Interactive control of large-crowd navigation in virtual environment using vector field [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(6): 37-46.
- [15] 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.
- [16] Dobbyn S, Hamill J, O'Connor K, et al. Geopostors: a real-time geometry/impostor crowd rendering system [C]//The 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, NY, USA: ACM, 2005: 95-102.