

6-5-2020

Multi-Character Animation Scene Construction Based on Crowd Patches

Wang Xin

1. Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;;2. Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China;

Shao Lei

1. Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;;2. Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China;

Shengyong Chen

1. Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;;2. Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China;

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.

Multi-Character Animation Scene Construction Based on Crowd Patches

Abstract

Abstract: In order to simulate large-scale crowd motion, a synthesis method based on crowd motion patches is proposed. First, *the characters' statistical model in a single crowd patch is obtained based on PCA* by taking several sets of motion data with same semantics. *An algorithm which controls the character's position in the motion crowd is proposed based on Voronoi diagram. A steady crowd motion model and detailed motion information of each character are achieved using the proposed algorithm.* Finally, taking into account the random interactive motion of the crowd characters, we propose an algorithm that presents the interactions of characters in the motion crowd *by adding interactive concept in the steady crowd motion model.* After the above steps, we accomplish to build a large-scale crowd motion scene. Experiment results show that large-scale crowd motion scene can be simulated and the detail of the multi-character interaction can be reflected by the proposed method.

Keywords

crowd patch, position control, motion patch, interactive motion, Voronoi diagram, statistical model

Recommended Citation

Wang Xin, Shao Lei, Chen Shengyong. Multi-Character Animation Scene Construction Based on Crowd Patches[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2670-2677.

基于人群运动片元的多角色运动场景构建

王鑫^{1,2}, 邵磊^{1,2}, 陈胜勇^{1,2}

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310023; 2. 浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 为模拟大型人群运动, 提出基于人群运动片元的合成方法。使用 PCA 主元分析方法, 通过输入多组相同语义的运动数据来得到单个运动片元中角色的运动统计模型。基于 Voronoi 图提出了一种角色在人群运动中位置信息控制算法, 以此得到一种稳态的人群运动模型和各个角色的详细运动信息。在稳态人群运动模型中加入互动概念, 提出一种人群的角色交互运动合成算法。最终完成对整个大型人群运动场景的构建。实验结果表明, 该方法能较好地完成大型人群运动场景的模拟, 较好得体现角色的交互细节。

关键词: 人群运动; 位置控制; 运动片元; 交互运动; Voronoi 图; 统计模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)11-2670-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711011

Multi-Character Animation Scene Construction Based on Crowd Patches

Wang Xin^{1,2}, Shao Lei^{1,2}, Cheng Shengyong^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to simulate large-scale crowd motion, a synthesis method based on crowd motion patches is proposed. First, the characters' statistical model in a single crowd patch is obtained based on PCA by taking several sets of motion data with same semantics. An algorithm which controls the character's position in the motion crowd is proposed based on Voronoi diagram. A steady crowd motion model and detailed motion information of each character are achieved using the proposed algorithm. Finally, taking into account the random interactive motion of the crowd characters, we propose an algorithm that presents the interactions of characters in the motion crowd by adding interactive concept in the steady crowd motion model. After the above steps, we accomplish to build a large-scale crowd motion scene. Experiment results show that large-scale crowd motion scene can be simulated and the detail of the multi-character interaction can be reflected by the proposed method.

Keywords: crowd patch; position control; motion patch; interactive motion; Voronoi diagram; statistical model

引言

在日常生活中, 人群运动随处可见, 随着近年

来虚拟现实技术的快速发展, 对单个角色^[1-3]进行模拟, 特别是在虚拟环境中进行人群运动的构建渐渐地成为研究的热点。人群运动的虚拟构建在动画、游戏、城市交通、建筑等领域均有着巨大的应用价值和前景。但是, 人群运动具有严格的时间和空间约束。因此, 如何高效并真实的构建虚拟人群运动场景^[4-7]成为计算机图形学领域的一大难点。



收稿日期: 2016-5-30; 修回日期: 2017-07-17;

基金项目: 国家自然科学基金(61303142, 61103140, 61173096), 浙江省自然科学基金(Y1110882, R1110679);

作者简介: 王鑫(1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为计算机视觉、计算机图形学。

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

• 2670 •

对于一个至两个角色之间的交互运动模拟,国内外已经有了较为成熟的方法, Liu 等^[8]基于物理的方法创建出单角色运动序列,以优化合成多角色运动。Yin 等^[9]提出了一种有限状态控制器 SIMBICON,通过人体运动状态转换过程来实现角色动画合成。Ikemoto 等^[10]基于动力学方法,通过高斯过程模拟的人体运动过程,计算角色的运动。然而这些传统方法对于人群运动并不适用,随着人群中个体数量增加,计算量和计算数据会呈现指数型增长,无法满足人群模拟需求。

众多研究人员对于模拟人群运动的问题同样也提出了很多方法。Wolinski 等^[11]提出了一个新的基于真实人群运动的框架,用于优化评估所有参数的人群仿真算法。Lee 等^[12]提出了一种基于数据驱动的语义化角色交互场景构建方法,通过“生成——排序”步骤得出该语言化信息下的最优解。吴云鹏等^[13]提出了一种融合情绪的人群实时规划路径算法,对人群情绪进行建模,得到不同情绪的人群路径偏好。但是这些方法无法同时很好地体现单个角色的运动细节和整个人群的运动趋势。

针对上述存在的问题,本文尝试设计一种新的方法,构建出一个稳态的,具有交互性运动的大型人群运动场景。不仅能从整体上表现稳态的人群运动,还能对角色之间细节上的交互性运动进行很好的模拟,同时能解决大部分角色运动中存在的碰撞和重叠问题。

受 Yersin 等^[14]提出的人群运动片元的概念的启发,本文的思路如下,通过对现实世界中日常人群运动的观察可知,人群运动中的基本单元并不是单一个体,在一般情况下,由小团体组成的小型运动群体,类似于父母带着小孩、2~4 人的结伴出行、男女朋友约会逛街等才是整个大型人群运动场景中的基本单元。因此我们可以将这些小型运动团体作为一个人群运动片元内的角色单元,角色个数一般为 1~4 人,首先制作出人群运动片元中各个角色的运动姿态,在这里,我们使用基于统计的 PCA 训练方法对小团体内的角色运动进行优化。再以运

动片元为人群运动的基本单元进行人群队形控制,即可制作出平滑、流畅的人群运动。以该方法进行模拟的人群运动具有真实、可靠,计算简单的优点,同时也能高质量的完成对人群运动的虚拟构建工作,对真实人群的还原度高。

1 角色运动模型

结合真实人群的运动状况、人群运动一般不以单个角色作为单独的运动单元,通过观察可知,单个角色在人群中大都和附近的同伴结成一个小型运动团体,“扎堆”现象在人群运动中十分常见。因此我们可以考虑以这些小型运动团体作为运动片元的基本单元。

在人群运动片元中,一般意义上包含 1~4 位角色的运动信息,我们首先要完成的工作是建立同一个运动片元中的角色的运动模型,即运动片元中角色单元的运动信息。为了使模拟的角色运动更加自然、生动,提高模拟的真实性,采用一种统计模型的方法建立人群运动片元的运动模型。

通过 Min 等^[15]的研究,我们可以得知,使用有向图和运动角色的语义化信息,可以搭建出丰富的角色运动状态。因此我们采用由有向图组成的状态机作为运动角色的基本模型,通过对 6 组相同语义的运动进行 PCA 方法处理,得到较为生动和真实的模拟运动模型。

针对每个输入的基本运动数据集,我们对其进行分段,将不包含关键帧信息的运动信息以基本相同的时间段分成 6 份,作为下一步通过统计信息得到的角色运动模拟样本。而对于关键帧信息处理,则采用输入的具有相同语义的运动数据提取关键帧后作为统计信息的样本。

我们应用 PCA 方法对样本数据进行处理,可以得到一段经过统计模型变换后的运动片段为

$$M = M_0 + M' \quad (1)$$

$$M' = [m_1, \dots, m_6] \cdot \vec{W} \quad (2)$$

其中: M_0 为所有运动的平均实例,即代表着同种语义信息的平均运动; $[m_1, \dots, m_6]$ 为一组正交的载

体矩阵，而 \vec{W} 为权重向量。

简单来说，我们通过 PCA 主元分析方法，对运动片段进行降维，得到了一组低维运动参数 \vec{W} ，以此对原始运动数据进行形变，使得每个运动片段的运动模型更加生动和真实，增强了整个虚拟场景的可靠性。

2 人群运动片元构建

在自然界中，很多生物个体有独立的领域，同样的，不相互熟悉的人与人之间同样会潜意识的保持一个自己的独立空间，心理学上称之为“人际气泡”^[16]，当有其他陌生人进入自己的“气泡”时，会下意识的感觉不舒服，并对自己的位置进行相应调整。这种现象在人群运动中随处可见，但是熟悉的人之间不存在“气泡”，即角色单元内不存在各个角色的单独领域，而小型运动群体之间存在“气泡”，可以很明显的看到人群运动中的“分堆”现象。受此启发，我们可以将人群运动片元看成是另类的“气泡”现象。由此，本文引入一种变形的 Voronoi 图来对该问题进行建模，从而得到一个稳态的人群运动模型。

2.1 人群运动片元建模

在整个大型人群运动场景中，由于每个小型运动群体中角色与角色间不存在“气泡”间隔，因此每个运动片元可以被看成一个单元，可以将角色单元的中心点作为运动片元中的整体角色位置。设 p_i^j 为第 i 个运动片元的第 j 个角色位置，可得到第 i 个运动片元中的整体角色位置 p_i 可通过式(3)确定：

$$d_i = \min \sum_{j=1}^n \|p_i^j - p_i\|^2 \quad (3)$$

当 d_i 满足条件时，此时可取得 p_i 的值。其中 n 为运动片元中的角色个数。得到整个大型群体运动场景中的点集 $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ 。任意 $p_i \in P, i = 1, \dots, N$ 可以称为人群站点。定义场景中任意一点 s 到站点 p_i 的距离 d 为：

$$d(p_i, s) = \|p_i - s\|^2 \quad (4)$$

当 p_i 是场景中距离 s 最近的角色位置或者是距离最近的角色位置之一时，定义满足该条件的所有 s 点构成的区域为角色 p_i 的运动片元区域。考虑到实际情况，因为个体与个体的差异，个人领域的大小可能会不一致，即运动片元的大小也应有所差异，我们定义权重集 $W = \{w_1, \dots, w_N\}$ 与角色位置一一对应。

$$d_p(p_i, s, w_i) = d(p_i, s) - w_i \quad (5)$$

最终可得到每个角色单元的区域大小为

$$S(p_i, w_i) = \{s \mid d_p(p_i, s, w_i) \leq d_p(p_k, s, w_k)\} \quad (6)$$

由用户自定义的权重集可进一步得到每个人群运动片元片元容量 $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ ， V 为该 $S(p_i, w_i)$ 区域的面积：

$$V = A(S(p_i, w_i)) \quad (7)$$

其中： $A()$ 为面积。最后定义能量函数：

$$E(P, W) = \sum_{i=1}^N (S(p_i, w_i) - v_i)^2 \quad (8)$$

当 E 达到最小，即为 0 时，人群运动达到稳态，即严格满足了设定的人群运动片元容量限制。

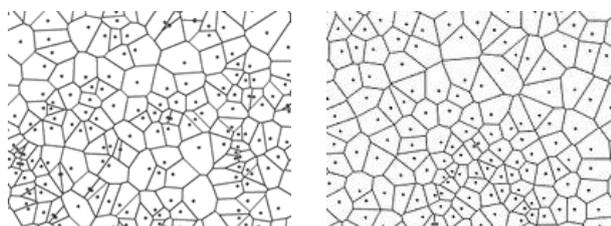
对每个角色单元进行质心约束，即所有的角色单元均位于运动片元质心，在这种情况下，首先能确保角色在运动片元内部，保证人群运动的稳定性，另一方面满足能量函数的最小条件，促进人群运动状态的收敛。

2.2 角色位置控制

针对人群运动的问题，Voronoi 图的每个运动片元都是一个凸多边形，该凸多边形的形状和大小都跟相邻的单元角色和自身的权重有关。根据设定的每个单元角色的权重，通过公式(4)可以得到相邻运动片元的拓扑结构。

具体构建人群运动的 Voronoi 图思路如下，首先假设权重为 0，可得到初始人群运动片元结构。然后分别计算各对相邻运动片元的权重之差，以此为依据移动相邻运动片元之间的分割线，从而扩大或者缩小每个运动片元。最后可得到基于权重的人

群运动 Voronoi 图。如图 1 便是构建的基于 Voronoi 图的人群角色分布示意图。



(a) 初始随机

(b) 有权值的质心

图 1 基于 Voronoi 图的人群角色分布示意图

Fig.1 Distribution of crowd based on Voronoi diagrams

综合 Morping, Lloyd 方法^[12], 采用上文提到过的质心约束, 施加容量限制, 可以得到基于质心约束的人群角色稳态分布的控制方法。该算法以角色的几何位置为着眼点, 主要用于调整角色在人群中的相对位置。角色由初始的随机位置可构建整个运动场景的 Voronoi 图, 通过算法控制, 可以得到一个质心分布的人群运动场景。该算法有如下优点:

1. 考虑到实际人群运动情况, 大部分的人群运动都长期处于稳态中, 即满足位置调整后的人群中的角色分布, 因此该算法不讨论在位置调整时的角色交互, 大大降低了算法复杂度。

2. 通过设定权值, 可以实现角色与角色之间的非均匀分布, 真实体现了在人群运动的重要特点。

3. 通过质心约束条件, 角色控制在运动片元中心, 更利于下一步的角色交互性运动的控制。

4. 该算法实施简单, 稳定性高, 效果良好。

首先由用户定义单元角色权重, 输入数据为随机单元角色位置集合 $P = \{p_1, \dots, p_N\}$, 用户自定义的权重集 $W = \{w_1, \dots, w_N\}$, 由此, 可通过等式(8)可计算出此时初始运动片元容量集为 $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ 。本算法采用初始 V 和初始 P 为输入参数进行计算。

角色分布位置控制算法可表示为:

算法 1: 角色位置分布

Q(): 质心计算公式

S: Voronoi 图

```

1: W = 0
2: p' = p
3: while P' ≠ 0 do
4:   P', minE(P, W), V → W'
5:   S = S' (S'由 W'更新)
6:   W' = 0
7:   q = Q(V)
8:   if P' == q then
9:     break
10:  else
11:    P' move to q
12:  end if
13: end while

```

本算法考虑到通过公式可以得到自定义 W 时的运动片元容量 V , 而当算法中的权重集 $W = 0$ 时, 可以有效地避免角色与角色之间的碰撞, 大幅度简化了计算, 并且对于人群中角色的位置变化陈述得更加直观。

3 人群交互性运动

在现实世界中, 陌生人之间也会由于各种原因发生各种交互性运动, 类似打招呼, 问路等情况。因此我们的研究工作中也要考虑模拟类似的人角色互动, 不仅使我们模拟人群运动时更符合真实情景, 而且令整个大型场景呈现得更加生动, 有序。

在上文的角色位置控制算法基础上完成交互性运动的算法构建具有如下优势:

1. 在角色分布控制中已经获得了每个角色的位置信息和运动片元的容量信息, 控制简单。

2. 可计算每个交互角色运动的发生交互的位置, 减少了运动交互的不确定性。

3. 量化的时空信息, 大大简化了的人群运动中角色交互模拟的复杂度。

4. 已知的控制信息很多, 可以有效的避免角色交互运动时在空间上发生的碰撞、穿越、丢失, 和在时间上发生的不同步问题。

5. 算法实现简单, 稳定性高, 能有效模拟人群中角色交互。

我们首先选取随机数量的运动片元对, 将这些随机片元对作为即将进行角色运动交互对象。方法

如下, 首先确定随机片元对数目, 再在总单元角色中随机选取一个单元角色以及一个它相邻的角色, 并将这对角色从总单元角色中除去, 迭代该过程, 直到取出所需的角色对数为止。

而其他运动片元内的角色对象维持现状, 以此模拟真实运动场景中随机产生的角色之间的相互运动。由于运动片元中角色的位置信息已经掌握, 由每队交互运动的角色对象的初始位置和相应的角色运动速度, 可以计算出发生交互运动的时间和空间信息。

具体算法如下:

算法 2: 人群交互运动

rand(): 随机取出一个角色团体

num: 发生交互的单元角色对数

interact(): 正在发生交互运动

goback(): 角色返回质心位置

T: 模拟场景运行总单位时间, 用于运动场景渲染刷新

```

1: num = random(N/2)
2: p1 = 0
3: p2 = 0
4: for i = 1 to num*2
5:   p1[i] = rand(P - p1 - p2)
6:   p2[i] = rand(neigh(p1[1]) - p1 - p2)
7:   loc[i] = (local(p1[i]) - local(p2[i])) / (v(p1[i]) + v(p2[i]))
8: end for
9: while T-- do
10:  p1 move to loc
11:  p2 move to loc
12:  if p1 in interactive then
13:    interact()
14:  elseif p1 end interactive
15:    goback(p1, p2)
16:  end if
17: end while

```

4 实验结果与分析

本文实验建立在随机角色的样本运动数据上, 对小范围内的人群运动环境进行详细分析来得到大型场景中的实际模拟效果。这可以更好的展示出本文的人群运动算法的特点与优势, 同时还有很好

的实验效果。

4.1 角色运动模型构建结果与分析

角色运动模型构建的目标是建立一个基于统计模型的少量角色在短时间内的运动图, 输入为 6 组相同语义的数据, 例如 6 组行走的运动数据, 通过 PCA 训练, 得到一组平滑的, 流畅的运动图数据。以此作为下一步单个人群运动片元的运动数据。

因两名角色的运动图具有典型意义, 在这里我们取两名角色作为一个运动单元。通过对比来显示出 2 名角色在经过算法处理前后的运动数据模型的变化。

在图 2 中我们可以很明显的看到, 经过 PCA 方法得到的运动统计模型对比原始输入数据得到的运动模型具有更好的平滑性。例如 a 中可以看出两名角色不仅挨的比较近, 而且两名角色的走路姿势也不是很协调。而对比 b 图的两名角色的走路姿势可以看出两名角色的行走距离控制的比较好, 而且行走姿势对比前图也更平滑和流畅。



(a) 原始输入数据构建的运动图



(b) 基于统计模型的角色运动图

图 2 角色运动模型构建部分结果

Fig.2 Partial resultsof construction of Multi-Character

4.2 人群运动片元建模结果与分析

本文基于一种变形的 Voronoi 图来对整个人群运动进行建模, 通过观察真实人群运动规律, 提出角色在人群中的运动主要是以小团体为主要单位。综合考虑, 本文提出一种角色位置控制算法, 可以

比较真实和可信的模拟出每个角色在整个人群中的随着时间变化的位置移动趋势,即可以得到小型角色团体在人群中时空信息,方便进行下一步的人群运动交互计算。

首先将角色放置在随机位置上,然后通过有质心约束的角色位置控制算法和设置每个角色的权重信息,将角色慢慢移动到各自运动片元的质心上。最后可以得到一个稳态的人群运动模型。该模型可以得到每个运动片元中角色的时空信息,便于角色的交互运动计算。

图 3 为角色初始随机位置,可以看到角色均不在运动片元的质心位置上,经过一段时间的角色运动后,可以形成类似图 4 中角色均在运动片元质心的稳态人群运动图。

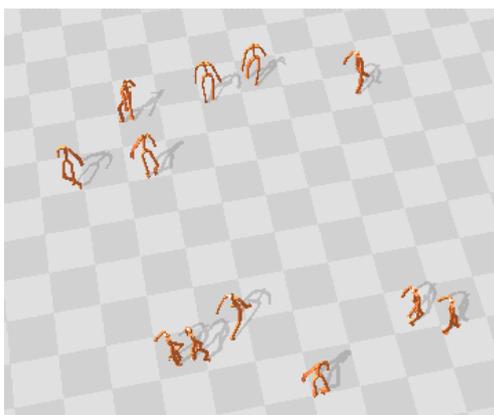


图 3 初始随机角色位置

Fig.3 Initial random Multi-Character's position

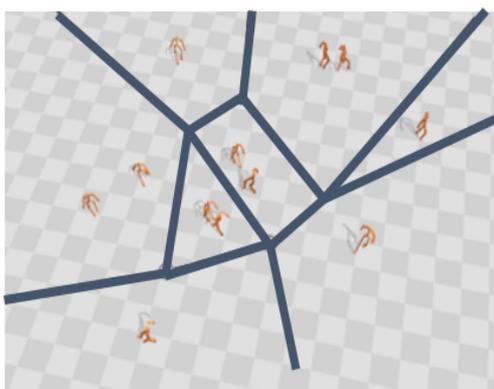


图 4 质心分布的角色位置

Fig.4 Multi-Character's position based on centroid

角色经过基于 Voronoi 图的质心分布算法控制移动后,得到了一个稳定的人群运动图,可以看到,在整个人群运动图上,每个角色都处于一种相对有序的运动状态中,方便下一步的人群交互运动计算。

4.3 角色交互运动结果与分析

交互运动模型的构建主要依托于上一步的角色位置控制。利用这些角色时空信息,可计算出发生交互的角色位置与时间。

我们随机选取发生交互的角色单元,例如图 5 中 3 位标记为红色的角色与一位蓝色的角色发生交互运动,有他们初始的位置关系,通过计算,可以得到他们的交互位置信息和时间信息。对该算法应用到整个人群场景,最后构建出整个人群交互运动场景。

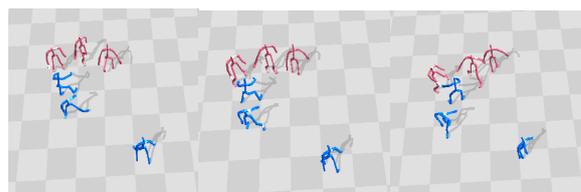


图 5 人群角色交互运动模拟图

Fig.5 Simulation of interactive motion of crowd

4.4 人群运动时间性能分析

该算法拥有较小的计算量和易控制的角色交互,对比其他随机交互算法所具有的不确定性,本文算法在时间性能上有较大的优势。

与图 6 中看到的运动拼接算法^[12]对比,图 5 中的 4 名角色虽然位置靠的较近,但是并没有发生交互性运动,即发生第一次交互的角色运动时间具有很大的随机性,而本文算法由于首先确定稳态的总体人群运动趋势,在对角色之间的交互进行模拟,发生交互时间稳定,总体性能较好,总体对比结果如表 1 所示。

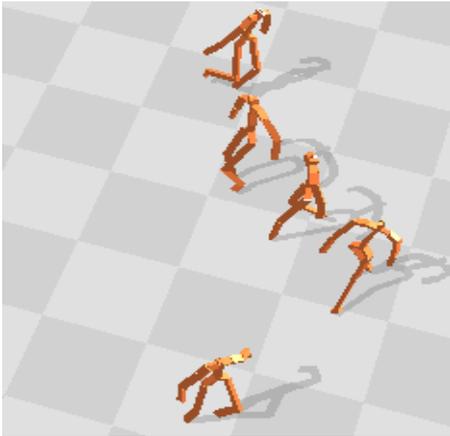


图6 运动拼接算法模拟图

Fig.6 Simulation of Tiling Motion Patches Algorithm

表1 角色发生第一次交互的运动帧数(所需时间)
Tab.1 Time of characters interact for the first time

方法	角色数	第一次交互角色运动帧数
本文算法	10	134
运动拼接	10	372

4.5 人群交互运动场景构建方法对比

本文使用的方法不仅能模拟构建一个稳态的人群运动场景,能体现在一个大型场景中角色整体的运动趋势,同时使用 PCA 对每个角色的运动动作进行优化,在人群中实现交互运动更能生动、真实的模拟人群运动中每个角色的运动特征。相对于其他的角色运动方法,本文完整的从人群整体、单个角色这两个方面进行人群运动模拟,同时由于增加角色位置控制,很好地解决了角色运动中的相互之间的碰撞和重叠的问题

从表 2 中 4 种不同方法的功能对比可以看出,运动片元拼接方法^[12]能在场景中很好的完成角色的随机运动交互过程,真实地模拟了角色在场景中的运动状态,但是无法体现整体的运动趋势,角色的运动显得杂乱。而传统的人群运动模拟能完成对整体的人群运动趋势分析,但是对于单个角色的运动细节没有描述。对于语义化的角色运动生成^[5]同样存在缺少对场景中的人群运动趋势的模拟,只能完成小范围的运动交互细节描述,同时由于没有随机性,因此无法体现出角色在真实场景中的随机性特点。

表 2 4 种多角色交互运动方法功能对比

Tab.2 Functional comparison of four Multi-Character interactive motion methods

方法	总体人群运动趋势	交互细节	随机交互
本文算法	√	√	√
运动拼接方法	×	√	√
传统人群运动模拟	√	×	×
语义化角色交互方法	×	√	×

5 结论

本文使用了一种基于人群运动片元来模拟大型多角色运动场景。该方法使用一种统计模型的方法生成小范围的角色运动图,以此作为大型运动场景中的角色单元。使用一种变形的 Voronoi 图来构建整个大型场景,通过质心约束的方法实现角色的位置控制。考虑到角色单元之间的交互运动,利用上述两步的方法得到的角色时空信息,设计了一种角色交互运动模拟算法。

对比已有的人群运动模拟方法,本文的算法有以下优势:(1)使用了一种统计方法来构建小范围的角色运动,使运动图具有更好的平滑性和流畅性;(2)使用了一种基于变形的 Voronoi 图构建的人群运动片元,通过质心约束,可以很容易的得到一种稳态的人群运动模型,更符合真实的人群运动,模拟的真实度更高;(3)在构建的人群运动图上进行交互运动计算,可以得到更稳定的人群运动交互运动模型,大大减少了交互运动固有的不确定性。

参考文献:

- [1] Guay, Martin, Ronfard, et al. Space-time sketching of character animation[J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2015, 34(4):1-10.
- [2] Xia Shihong, Wang Congyi, Chai Jinxiang, et al. Realtime Style Transfer for Unlabeled Heterogeneous Human Motion[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2015, 34(4):1-10.
- [3] Y Lee, K Lee, SS Kwon, et al. Push-recovery stability of biped locomotion[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2015, 34(6):1-9.
- [4] Eunjung Ju, MyungGeol Choi, Minji Park, et al. MorphableCrowds[J]. ACM Transactions on Graphics

- (S0730-0301), 2010, 29(6): 140.
- [5] Jungdam Won, Kyungho Lee, Carol O'Sullivan, et al. Generating and Ranking Diverse Multi-Character Interactions[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2014, 33(6):1-12.
- [6] 王鑫, 孙守迁, 邵明. 运动路径驱动的角色动画合成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3):319-324.
Wang Xin, Sun Shouqian, Shao Ming. A Path-Driven Character Animation Synthesis Method[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2009, 21(3):319-324.
- [7] 王鑫, 陈秋迪, 王万良. 基于可变形运动模型和运动片元的多角色运动合成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10):1810-1817.
Wang Xin, Chen Qiudi, Wang Wanliang. Multi-character Animation Based on Deformable Motion Model and Motion[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(10):1810-1817.
- [8] CK Liu, AHertzmann, Z Popovic. Composition of Complex Optimal Multi-Character Motions[C]//ACM Siggraph/eurographics Symposium on Computer Animation, SCA 2006, Vienna, Austria, September. DBLP, 2006:215-222.
- [9] KK Yin, K Loken, MVD Panne. SIMBICON: simple biped locomotion control[J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2007, 26(3): 105.
- [10] L Ikemoto, O Arikan, D Forsyth. Generalizing motion edits with Gaussian processes[J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2009, 28(1):441-453.
- [11] WolinskiD, GuySJ, OlivierAH, et al. Parameter Estimation and Comparative Evaluation of Crowd Simulations[J]. Computer Graphics Forum(S0167-7055), 2014, 33(2):303.
- [12] Kyunglyul Hyun, Manmyung Kim, ManmyungKim, et al. Tiling Motion Patches[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics(S1077-2626), 2013, 19(11):1923-1934.
- [13] 吴云鹏, 杜沅泽, 叶阳东. 融入情绪模型的人群实时路径规划[J]. 中国图象图形学报. 2015, 20(9): 1262-1274.
Wu Yunpeng, Du Yuanze, Ye Yangdong. Real-time emotion-integrated crowd path planning[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(9): 1262-1274.
- [14] YersinB, MaïmJ, PettréJ, et al. Crowd Patches: Populating Large-Scale Virtual Environments for Real-Time Applications[C]. ACM Siggraph Symposium on Interacted Graphics & Games, 2009: 207-214.
- [15] Min J, ChaiJ. Motion Graphs++: a Compact Generative Model for Semantic Motion Analysis and Synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics(S0730-0301), 2012, 31(6):439-445.
- [16] 郑利平, 程亚军, 周乘龙, 等. 异构群体队形光滑变换控制方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 10(10): 1963-1970.
Zheng Liping, Cheng Yajun, Zhou Chenglong, et al. Research on Smooth Formation Control of Heterogeneous Crowds[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2015, 10(10): 1963-1970.

(上接第 2669 页)

- [19] 罗月童, 石放放, 张伟, 等. 结合 K-D 树和 Shell 的快速动态等值面光线跟踪法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(2):193-201.
Luo Yuetong, Shi Fangfang, Zhang wei, et al. Fast isosurface ray tracing method by combining K-D tree and Shell[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(2): 193-201.
- [20] 马骊溟, 徐毅, 李泽湘. 基于动态网格划分的散乱点 k 邻近快速搜索算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(8):10-11.
Ma Liming, Xu Yi, Li Zexiang. Fast k-nearest Neighbors Searching Algorithm for Scattered Points Based on Dynamic Grid Decomposition[J]. Computer Engineering, 2008, 34(8):10-11.
- [21] Bo S, Du J, Tian G. Study on the Improvement of K-Nearest-Neighbor Algorithm[C]// Artificial Intelligence and Computational Intelligence, International Conference on. IEEE, University of Louisville, Louisville, USA, 2009:390-393.