

基于可变形运动模型的多角色语义化运动合成

王 鑫 陈秋迪 梁朝凯 王万良

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

(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 对于一个完整的虚拟环境而言,智能的人群运动会使其更为生动、逼真。针对人群运动数据存在维度高、可控性差的问题,提出一种多角色可变形运动模型,将其将人体运动分解为几何与时间变化两部分,并使用 PCA 算法进行有效降维,构建可变形运动模型的低维语义空间。实验结果表明,提出的方法能根据语义需求调节语义参数,实现多角色的语义化运动分析与合成。

关键词 运动分解,可变形运动模型,多角色运动,运动合成

中图法分类号 TP391.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.059

Multi-characters Semantic Motion Synthesis Based on Deformable Motion Model

WANG Xin CHEN Qiu-di LIANG Chao-kai WANG Wan-liang

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

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

Abstract Intelligent crowd motion can make the virtual environment seem realistic. Aiming at the problem of high dimension and poor controllability of crowd motion data, a deformable motion model for multiple characters was proposed. It decomposes the crowd motion data into geometry and time variations, uses PCA to reduce dimension, and then constructs a low-dimensional semantic space of multi-characters deformable motion model. The experiments show that the proposed method can adjust the parameters according to the semantic requirements for semantic multi-characters motion analysis and synthesis.

Keywords Motion decompose, Deformable motion model, Multi-characters motion, Motion synthesis

1 引言

随着计算机视觉与计算机图形学技术的飞速发展,人群运动仿真技术受到了越来越多学者的关注与研究,是近年来计算机学术领域的研究热点之一。基于运动捕获数据的运动合成技术已被证实能够很好地降低仿真人体运动的制作成本,提高运动合成效率,但是对于人群运动的仿真仍旧需要占用大量的计算和存储空间。因此,如何利用现有运动数据合成丰富、真实、可灵活控制的人群动画,具有重要的研究意义和广阔的应用前景。

人群仿真的目标是通过某种建模方法,在虚拟环境或混合现实环境中实现多角色的建模。Reynolds^[1]在群体行为仿真方面做出了开创性的工作,于 1987 年提出了基于规则的方法,使用粒子系统来模拟自然的鸟群、鱼群、兽群等群体动画。后来他还将群体行为扩展到寻找、追逐和躲避等复杂行为^[2]。虽然 Reynolds 的方法并没有涉及人群的动画,但是为人群行为仿真研究打开了思路。Duives^[3]等人对现有的人群运动仿真模型进行了全面概述,他们的研究涵盖了元胞自动机、社会

力模型、速度场模型、连续模型、混合模型、行为模型等,并对这些模型进行了详细的比较分析。

许多研究者将统计学模型应用到运动数据的参数化表示中,使用统计学习的方法对运动数据进行处理。统计模型通常用一组数学函数来表示,用少量的隐含参数及其相关联的概率分布来表示人体运动。到目前为止,已经存在许多比较成熟的统计模型应用于运动分析与合成、风格化运动编辑与合成等方面。

Brand^[4]等使用参数化的隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)构造了一个运动状态机(State Machine)对舞蹈运动进行建模,通过连续的学习行为生成不同风格的运动。Urtasun^[5]等人对 PCA 进行扩展,通过训练不同速度、不同风格的行走、跑步、跳跃运动数据,合成多种风格的运动。Li^[6]等人使用线性动态系统(Linear Dynamic System, LDS)构建了一个两层的统计模型,通过学习运动基元(Motion Textons)和运动分布(Motion Distribution),高效率地合成和编辑运动。Glardon^[7,8]等人使用 PCA 降维方法,提取出运动速度参数,实现变速人体运动合成。Hsu^[9]等人采用线性时

到稿日期:2014-05-03 返修日期:2014-07-16 本文受国家自然科学基金(61303142, 61173096, 61103140),浙江省自然科学基金项目(Y1110882, Y1110688, R1110679),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20113317110001),浙江省教育厅一般科研项目(Y201330304)资助。

王 鑫(1984—),男,博士,讲师,主要研究方向为角色动画、计算机视觉, E-mail: xinw@zjut.edu.cn; 陈秋迪(1988—),女,硕士,主要研究方向为角色动画; 梁朝凯(1994—),男,主要研究方向为角色动画; 王万良(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机智能。

不变系统(Liner Time-invariant Model)学习同类型但不同风格运动数据的差异,通过改变输入运动的风格特征,合成特定的风格类型。Niwasce^[10]等人用半隐马尔可夫模型(Hidden-semi-Markov Model, HSMM)对每组运动单元(Motion Primitives)建模,通过控制参数来改变步行的速度和步幅。Tanco^[11]等人使用了一个两层的隐马尔可夫模型,通过指定起始帧和结束帧,统计模型就能够产生两帧之间的过渡运动。Chai^[12]等人使用PCA对数据降维,并使用线性时不变系统建立统计动态模型,采用最大后验来进行优化计算,求解基于约束的运动合成问题。Lau^[13]等人从输入运动数据中学习动态贝叶斯网络模型(Dynamic Bayesian Networks, DBN),对数据中的时空变化进行建模,从而合成新的运动。Wei^[14]等人提出了将物理约束和统计模型相结合的方法,用于人体运动的分析与合成。

近年来随着运动捕获技术的发展以及计算机视觉的深入研究,数据驱动的方法被广泛应用到人体运动合成和人群运动仿真。基于运动数据驱动的方法具有较强的真实性和可靠性。视频数据在日常生活中较易获得,且视频数据研究发展较为成熟,因此许多学者提出从视频中提取人群的行为数据,并用这些数据来复原人群行为,训练仿真模型中的参数,驱动虚拟人群运动,这类方法能直观地指定群体的行为。Lerner等^[15]采用基于实例的人群仿真技术,采集真实世界中人群运动视频片段,利用真实运动轨迹驱动仿真人群;他们的仿真agent是无目标的漫游运动。Courty等^[16]从真实的人群视频序列中评估速度场来驱动仿真人群。Lee等^[17]使用一个鸟瞰摄像机采集真实的人群运动数据,提取人群中每个个体的二维运动轨迹,学习一个Agent模型,来生成真实的虚拟人群运动;但其没有考虑季节、天气等环境因素,构建一个参数化行为模型可作为未来方向。Ju等^[18]引入一个可变形人群模型来控制人群队形和个体轨迹,利用基于规则的Agent仿真数据和真实的人群视频数据,生成不同风格的人群运动,但是他们的模型没有考虑环境因素。

使用运动捕获系统能获得真实、细腻的单人运动,但是对于多角色运动的捕获,表演者之间仍旧会出现遮挡、干扰等现象,得到的实验结果也产生了许多误差。基于对这些情况的考虑,提出一种多角色可变形运动模型,在提取视频中行人的运动路径后,利用运动状态机为路径配上3D角色运动,从而实现多角色运动的合成。

2 可变形运动模型方法概述

Blanz和Vetter^[19]提出可变形模型的方法,用于自动三维人脸重建。他们将人脸的变形分为了几何形状与纹理映射两部分。Min等人^[20]在2009年提出了一种可变形运动模型,将人体运动分解为几何与时间变化两部分。受到人脸形变模型的启发,将Min等人的可变形运动模型扩展到多人,通过调节训练仿真模型后得到的参数,合成新的运动序列,从而得到一种新的多角色的可变形运动模型。

本文算法主要分为两个步骤:第一步,数据预处理和运动单元的构建。首先,自定义多种视频采集方案,采集典型场景下的人群流动视频,提取视频中行人的运动路径,将相似的路径行为放入一个运动单元,构建语义化运动单元。从采集到的视频中提取出真实、丰富、多样的路径数据,为后期的统计

模型提供充足、可靠的训练数据。第二步,可变形运动模型的构建。将人体运动分解为几何变化与时间变化两部分,对每个运动单元中的运动数据进行PCA降维,通过统计分析获取运动特征参数,最终通过调节参数来实现不同的人群运动合成,合成过程如图1所示。

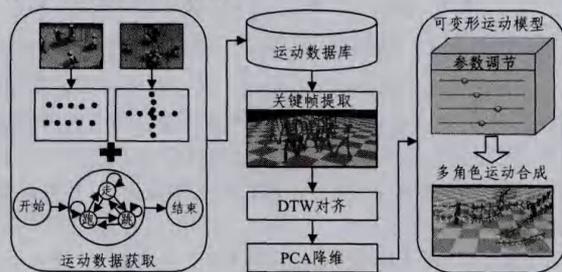


图1 基于可变形运动模型的多角色运动合成

3 视频运动数据预处理

3.1 自定义视频采集方案

借鉴文献[21]提出的行人路径跟踪算法,将长视频分解为连续的帧,提取每一帧中行人所处的位置 (x, y) ,其中每个行人都具有唯一的编号标识。每个行人的路径最终能够表示为离散像素点集 $T = \{p_i = (x_i, y_i) | i = 1, \dots, n\}$,其中 n 表示视频的帧数, (x_i, y_i) 表示该行人在第 i 帧时所处的位置。则一段视频中所包含的运动路径可以表示为 $V = \{T_j | j = 1, \dots, m\}$,其中 m 表示视频中包含的行人数目,即路径条数,每个行人对应一条路径。

生成了行人的运动路径之后,需要将二维点集转换为三维人体运动。借鉴文献[22]中提出的方法,利用一个结构化的运动状态机,为特定的运动路径配上特定的三维人体运动片段。将运动数据组织构造为一个结构化的运动状态机,并为状态机中的每个状态赋予高层次的语义含义。与文献[22]中的路径不同,为了提高后期的统计分析处理效率,运动范围被设定得较小,且一段路径一般仅包含一种运动形式,长度为一个运动周期。

3.2 运动数据表示

运动数据库中的运动实例被表示为高维向量 $\{M_n(t) | n = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T_n\}$,其中, N 是运动实例数, T_n 是第 n 个运动实例的帧数。向量 $M_n(t) = \{t_{k0}, q_{k1}, q_{k2}, \dots, q_{kJ} | k = 1, \dots, K\}$ 表示第 t 帧时各个角色的运动姿势,其中 t_{k0} 表示根节点的平移位置, $q_{k1}, q_{k2}, \dots, q_{kJ}$ 表示所有关节节点的旋转角度, J 表示关节数, K 表示该运动实例中包含的角色个数。

3.3 基于关键帧的运动单元聚类

关键帧是对运动数据的一种摘要表示,是运动序列中最有代表性、最能表达运动内容的姿势。因此,首先确定数据库中运动实例的关键帧,并根据关键帧对运动序列进行分段,提取完整的运动周期。如果几个运动实例有相同的关键帧集,那么它们将自动被放入相同的运动单元。

本文定义以下两类姿势为关键帧:(1)与地面接触发生变化的姿势(如“左脚尖离地”、“右脚跟着地”);(2)具有特定语义意义的动作状态(如跳跃运动中的“跳至最高点”)。这样的关键帧能保证在同一个运动单元内的所有运动是接触一致、结构相似的,并具有明确的语义意义。图2所示为“跑步并起跳”运动提取出的关键帧。

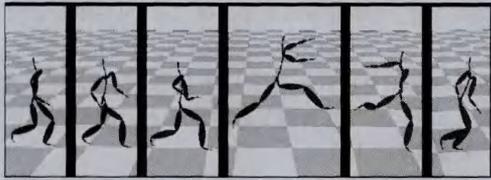


图2 “跑步并起跳”运动提取出的关键帧

关键帧的选取可采用半自动的方法。对于每类运动,如走、跑、跳等,均选取一部分运动实例,手动标注所有的关键帧姿势,然后利用 Lee^[23]等人提出的运动帧相似性度量方法,在剩下的运动实例中自动检索出相似的关键帧姿势,并将其归入同类的运动单元。

通过预处理,相同类型、不同风格(比如速度、步伐大小、方向、情绪)的一组运动序列被归入相同的运动单元,其中的运动片段具有相同的起始帧和结束帧。

3.4 DTW 对齐

运动片段之间的差异主要有时间差异和空间差异。为了对相同内容的运动进行统计分析,需要在时间上对运动片段进行对齐,使得运动片段在时间上同步、空间上结构相同。

动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)是典型的时间对齐方法。首先选取一个中性的运动序列(例如:正常的走路)作为标准运动,然后对其余序列按照关键帧分段后的子片段分别在时间上进行规整,如图3所示,对于3个长短不一的运动序列 (M_1, T_1) 、 (M_2, T_2) 、 (M_3, T_3) ,按照关键帧使用DTW 进行对齐。

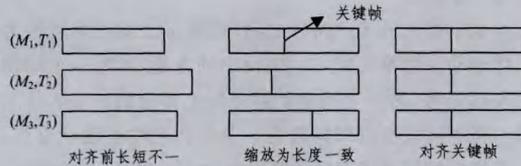


图3 DTW 对运动片段规整

时间对齐曲线可表示为一个 T 维向量 $\{W_n(t) | n=1, \dots, N, t=1, \dots, T\}$, 其中 T 是运动实例对齐后的帧数。用 $W_n(t)$ 对所有的运动实例 $M_n(t)$ 进行对齐, 规整后的标准时间轴上的运动序列为 $\{S_n(t) | n=1, \dots, N, t=1, \dots, T\}$ 。因此, 将初始运动序列 M_n 分解为两个数据集: 规整后的运动实例 S_n 和对应的时间规整函数 W_n 。两个数据集都定义在标准时间轴上, 便于进行统计分析。

4 可变形运动模型

经过上述过程, 初始运动序列被分解为两个数据集: 规整后的运动实例和对应的时间规整函数, 即对应人体运动的时间变化和空间变化两部分。

人体运动数据是高维向量, 在高维空间中难以直接对数据进行处理。而每个姿势中各关节之间的相关性很强(例如在走路运动中, 双手、双脚会前后交替摆动), 某一类运动的姿势往往会在某个低维的子空间中聚集, 因此, 需要通过有效的降维算法, 将高维的原始数据映射到低维的子空间, 从而避免维数灾难和复杂计算。本文采用 PCA 方法对原始运动数据进行高效的降维。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是经典的降维方法, 是机器视觉及模式识别中较为成熟的算法, 已被成功应用于各个领域。

4.1 几何变化建模

首先, 根据规整后的运动实例 S_n 构造一个可变形几何模型 $S=G(\vec{\alpha})$ 。原始运动数据分布在一个高维的运动空间中, 对该分布进行建模就能通过控制少量的几个参数生成大量与原始运动相似的新运动序列。

S_n 是高维向量, 表示第 n 个运动实例的所有帧姿势。将 PCA 作用于 S_n , 构造一个可变形几何模型

$$S=G(\vec{\alpha})=g_0+\sum_{i=1}^m a_i \cdot \vec{\alpha}$$

其中, $g_0 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N}$ 表示运动数据库中所有运动的平均运动, $a = (a_1, \dots, a_m)$ 是载荷矩阵, m 为基向量个数, $\vec{\alpha}$ 是低维几何向量。那么, 降维后的第 t 帧姿势的可变形几何模型可表示为:

$$S(t)=g_0(t)+\sum_{i=1}^m a_i \cdot \vec{\alpha}(t)$$

为了解决保留多少个主成分的问题, 需要在准确性和紧凑性之间做一个权衡。通过实验分析可知, 对于“走路”运动数据库, $m=20$ 时就能保留 95% 的原始变化, 从而还原大部分的原始信息。

4.2 时间变化建模

对几何模型进行扩展, 将运动实例的时间变化纳入考虑的范围, 可提升可变形几何模型的精度, 因此这里将其规整为可变形时间模型 $W=T(\vec{\beta})$ 。由运动序列的时间顺序特性可知, 时间规整函数必须非负, 且严格单调递增, 所以直接将统计分析技术应用到时间规整函数上会出现问题。而如果直接将 PCA 应用到时间规整函数 W_n 上, 单调性则会被破坏。

因此, 借鉴文献[20]中的方法, 先将 W_n 转换为无约束的函数 Z_n , 对 Z_n 应用统计分析技术来构造可变形时间模型 $Z=T(\vec{\beta})$, 再将模型从新的空间 Z 转换回原始空间, 得到最终的可变形时间模型 $W=T(\vec{\beta})$ 。

对 $W(t)$ 进行如下转换:

$$Z(t)=\ln(W(t)-W(t-1))$$

$$W(t)=\sum_{i=1}^t \exp[Z(i)]$$

对 Z_n 进行主成分分析, 构造一个可变形时间模型:

$$Z=T(\vec{\beta})=t_0+\sum_{i=1}^n b_i \cdot \vec{\beta}$$

其中, $t_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i}{N}$ 表示所有对齐曲线的均值, $b = (b_1, \dots, b_n)$ 是载荷矩阵, n 为基向量个数, $\vec{\beta}$ 是低维时间向量。那么, 降维后的第 t 帧姿势的可变形时间模型可表示为

$$Z(t)=t_0(t)+\sum_{i=1}^n b_i \cdot \vec{\beta}(t)$$

将上述两个式子结合起来, 得到原始空间中的可变形时间模型:

$$W(t)=\sum_{i=1}^t \exp[t_0(i)+\sum_{j=1}^n b_j \cdot \vec{\beta}(i)]$$

4.3 可变形运动模型构建

通过对上述两部分变化使用 PCA 降维, 获得了 a_i 和 b_i 两个向量, 以及由 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{\beta}$ 张成的两个低维子空间, 分别描述其几何特征和时间特征。

将上两节描述的可变形几何模型 $G(\vec{\alpha})$ 和可变形时间模型 $T(\vec{\beta})$ 相结合, 构造一个完整的可变形运动模型:

$$M(\vec{\alpha}, \vec{\beta})=G(\vec{\alpha}) \otimes T(\vec{\beta})$$

其中,操作 \otimes 表示将运动序列 S_n 用时间规整函数 W_n 进行规整。

对于运动实例的几何信息 S_n , 使用 PCA 后获得了具有特定语义意义的低维几何参数 $\vec{\alpha}$, 对于运动实例的时间信息 W_n , 使用 PCA 后获得了具有特定语义意义的低维时间参数 $\vec{\beta}$ 。 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{\beta}$ 构成了可变形运动模型的低维语义空间, 能对原始运动数据进行有效的降维并提取语义意义。用户可以根据需求对 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{\beta}$ 进行修改, 从而得到新的运动序列 $X=M(\vec{\alpha}, \vec{\beta})$ 。

5 实验结果

实验所采用的运动数据库中包括走路、跑步、跳高、跳远、站立、蹲下、站起、捡起、放下、坐下、弯腰、爬上、爬下、握手、挥手等不同的运动, 以及它们之间的过渡运动。本节将通过语义化处理可变形运动模型, 得到最终成果。

5.1 语义化运动分析

对运动进行语义化分析得到语义化的可变形运动模型。对于一个输入运动序列 Z_{input} , 通过合成与输入运动 Z_{input} 最相似的运动序列, 提取合成运动序列的语义信息, 自动对 Z_{input} 进行语义化标注, 实现对 Z_{input} 的语义化运动分析。这种通过合成新运动来分析输入运动的方法, 不仅能够将输入运动序列分割为多个运动单元, 还可以将运动单元分类, 用预先定义好的词汇进行标注。例如, 语义化运动分析能通过计算一个走路运动行走的步数, 确定捡起运动捡起物体的时间地点。

对运动数据进行语义化分析有助于对运动数据的编辑、控制、检索等操作。利用前文所提出的可变形运动模型, 能够对运动进行自动分割、分类、标注等处理。如图 4 所示, 给定一个测试运动序列, 该序列包含 4 种典型运动: 走路、下蹲、捡起、放下, 以及其间的过渡运动。通过语义化分析, 可获得该测试序列的语义化信息: 角色 A (灰色标注) 走三步、蹲下、捡起、站起、走四步、弯腰、放下; 角色 B (黑色标注) 走四步、弯腰、捡起、站起、走三步。

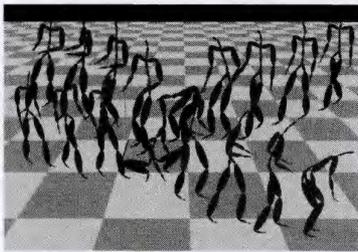


图 4 语义化运动分析

5.2 语义化运动编辑

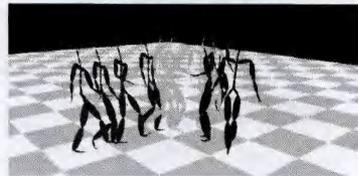
基于运动学的运动编辑修改的是低层次的运动细节, 而语义化的运动编辑更加注重修改高层次的运动细节, 包括运动数据的定性特征和定量特征。在语义化运动编辑之前, 首先用语义化运动分析提取输入运动数据中嵌入的语义信息, 然后对提取出来的语义进行编辑。运动编辑包括运动添加、删除、替换、缩放等操作。可以通过添加、删除特定的动词来修改输入运动的定性特征, 例如在“走”和“跑”运动之间加入“跳”运动; 同样, 可以编辑输入运动的定量特征, 例如“走”运动的步数、“捡起”运动的时间、“爬上”运动的高度等。通过语义化运动编辑, 可以修改“走路的步幅”、“走路的速度”等属性, 或者用“跑”、“跳”等运动来替代“走”运动。

如图 5(a) 所示, 角色 A 的运动用深灰色的一个关键帧序

列展示, 角色 B 的运动用黑色的两个关键帧展示。角色 A 保持走路运动的姿势, 角色 B 则保持原地站立并伸出手与角色 A 握手的姿势。角色 A 开始行走, 经过角色 B 面前后继续往前行走, 而角色 B 转身离开。我们对两个角色的运动进行分析, 提取出角色 B 的语义信息——握手, 于是对角色 A 的运动进行编辑, 在其经过角色 B 面前时, 程序插入一个“握手”的动作序列, 并产生走路与握手动作之间的过渡运动, 如图 5 (b) 所示, 用浅灰色表示插入的新运动。握手动作完成后, 角色 A 继续原始的走路运动, 角色 B 转身离开。



(a) 原始运动



(b) 替换后运动

图 5 语义化运动编辑

5.3 语义化运动控制

通过之前的预处理, 相同类型的一组运动序列被放入了相同的运动单元, 多角色可变形运动模型被构造并一步步地完善。在实验中, $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{\beta}$ 构成的可变形运动模型的低维语义空间往往取决于原始的运动数据, 不同的训练样本所提取出的语义信息具有大小不一的差别。例如, 对一组速度不同的跑步运动做训练, 得到的显著语义属性为速度; 对一组跳高运动做训练, 得到的显著语义属性则是跳跃的高度。

如图 6 所示, 对一组速度不同、步幅不同、摆臂幅度不同的两个角色交叉行走的运动进行训练后, 通过调节语义参数, 合成一系列相同类型、不同风格的运动序列。图 6 从左往右、从上往下的顺序分别是正常走、快速走、大步走、大步高摆臂走、大步慢走、不摆臂走。在这个实验中, 可以控制其中一个角色的运动保持不变, 对另一个角色的运动进行语义化控制, 从而得到不同的实验结果。

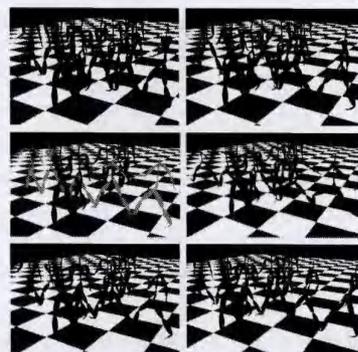
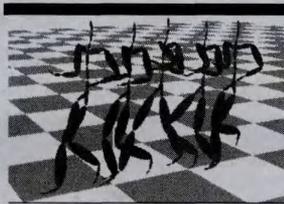


图 6 不同风格的走路运动

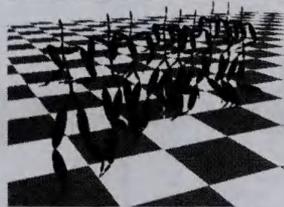
5.4 语义化运动合成

语义化运动合成能够让用户通过简单地发出如“走四步

到达点 A”、“在 B 点捡起物体”这样高层次的控制命令,来准确地、交互式地控制角色。语义层次的角色动画控制更多关注高层次的任务行为,而不是低层次的运动细节。图 7(a)展示了一个随机生成的跑步运动序列,图 7(b)展示了一个向左偏转的跑步运动序列,通过调节角色的运动轨迹和朝向的低维语义参数来实现。



(a) 随机跑步序列



(b) 改变轨迹的跑步序列

图 7 随机运动合成

结束语 本文主要介绍了多角色可变形运动模型的概念和构建方法,实现了多角色相似运动的分解与合成。通过对运动模型时空关系的处理,采用高效的降维方法,经过统计分析提取出运动数据的内在特征,构建低维的语义空间,最终实现通过调节参数来灵活地控制虚拟人群运动。实验结果表明,可变形运动模型能够合成丰富、逼真的多角色运动环境。

参考文献

[1] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34

[2] Reynolds C W. Steering behaviors for autonomous characters [C]//Game Developers Conference. 1999:763-782

[3] Duives D C, Daamen W, Hoogendoorn S P. State-of-the-art crowd motion simulation models[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2013, 37:193-209

[4] Brand M, Hertzmann A. Style machines[M]. New York: ACM Press, 2000:183-192

[5] Urtasun R, Glardon P, Boulic R, et al. Style-Based Motion Synthesis[J]. Computer Graphics Forum, 2004, 23(4):799-812

[6] Li Y, Wang TS, Shum HY. Motion texture: A two-level statistical model for character motion synthesis[J]. ACM Trans. on Graphics, 2002, 21(3):465-472

[7] Glardon P, Boulic R, Thalmann D. PCA-based walking engine using motion capture data [C] // Proceedings of Computer Graphics International, 2004. IEEE, 2004:292-298

[8] Glardon P, Boulic R, Thalmann D. A coherent locomotion engine extrapolating beyond experimental data [C] // Proceedings of CASA, 2004:73-84

[9] Hsu E, Pulli K, Popović J. Style translation for human motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3):1082-1089

[10] Niwase N, Yamagishi J, Kobayashi T. Human walking motion synthesis with desired pace and stride length based on HSMM [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2005, 88(11):2492-2499

[11] Tanco L M, Hilton A. Realistic synthesis of novel human movements from a database of motion capture examples [C] // Proceedings of Workshop on Human Motion, 2000. IEEE, 2000:137-142

[12] Chai J, Hodgins J K. Constraint-based motion optimization using a statistical dynamic model[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):8

[13] Lau M, Bar-Joseph Z, Kuffner J. Modeling spatial and temporal variation in motion data [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5):171

[14] Wei X, Min J, Chai J. Physically valid statistical models for human motion generation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(3):19

[15] Lerner A, Chrysanthou Y, Lischinski D. Crowds by example [J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3):655-664

[16] Courty N, Corpetti T. Crowd motion capture [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2007, 18(4/5):361-370

[17] Lee K H, Choi M G, Hong Q, et al. Group behavior from video: a data-driven approach to crowd simulation [C] // Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation. Eurographics Association, 2007:109-118

[18] Ju E, Choi M G, Park M, et al. Morphable crowds [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6):140

[19] Blanz V, Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces [C] // Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999:187-194

[20] Min J, Chen Y L, Chai J. Interactive generation of human animation with deformable motion models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 29(1):9

[21] Teknomo K, Takeyama Y, Inamura H. Tracking algorithm for microscopic flow data collection [C] // Proceedings of JSCE Student Conference, Sendai, Japan, 2000

[22] 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 Shou-qian, Shao Ming. A Path-Driven Character Animation Synthesis Method [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3):319-324

[23] Lee J, Chai J, Reitsma P S A, et al. Interactive control of avatars animated with human motion data [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3):491-500

(上接第 270 页)

[15] 杜芳, 陈跃国, 杜小勇. RDF 数据查询处理技术综述 [J]. 软件学报, 2013, 24(6):1222-1242
Du Fang, Chen Yue-guo, Du Xiao-yong. Survey of RDF Query Processing Techniques [J]. Journal of Software, 2013, 24(6):1222-1242

[16] 李慧颖, 瞿裕忠. KREAG: 基于实体三元组关联图的 RDF 数据关键词查询方法 [J]. 计算机学报, 2011, 34(5):825-836
Li Hui-ying, Qu Yu-zhong. KREAG: Keyword Query Approach over RDF Data based on Entity-Triple Association Graph [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(5):825-836