

3 维人体运动编辑与合成技术综述

王鑫 孙守迁 柴春雷

(浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要 为了使人们对3维人体运动编辑与合成技术有个概略了解,对当前3维人体运动编辑和合成技术的研究现状进行了系统阐述。首先对4大类3维人体运动合成方法进行了分析比较;然后按照运动捕获数据的表示方法、运动编辑技术、运动合成技术3个方面着重分析了运动捕获数据驱动的运动合成方法的发展现状;最后对目前3维人体运动编辑与合成技术研究中的难点问题及未来研究重点进行了展望。

关键词 虚拟人动画 动作捕获 运动编辑 运动合成

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)02-0233-10

An Overview of 3D Human Motion Editing and Synthesis

WANG Xin, SUN Shou-qian, CHAI Chun-lei

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract We present a comprehensive survey on state of art of 3D human motion editing and synthesis techniques. Firstly, four types of methods for generating 3D human motion were introduced and compared. Secondly, techniques of motion capturing data representation, motion editing and motion synthesis were reviewed. Finally, some open problems and future directions were discussed.

Keywords virtual human animation, motion capture, motion editing, motion synthesis

1 引言

随着信息技术的飞速发展,3维动画正在逐渐成为继声音、图像、视频和3维模型之后的第5种多媒体类型。作为3维动画的重要组成部分,人体动画在影视制作、计算机游戏等应用领域占据越来越重要的地位。为了得到形象逼真的人体动画,艺术、设计与计算机等领域的专家提出了很多方法。虽然这些方法使3维人体动画技术取得了很大的进展,但是由于人体运动包含的自由度很多,加之人眼对人体运动的失真非常敏感等原因,因此在计算机中模拟复杂的人体运动仍然存在着很多困难和挑战。这些方法大致可以分为以下4类:手工方法;基于物

理的方法;基于视频数据的方法;运动捕获数据驱动的方法。

在这4种方法中,运动捕获数据驱动的方法以其合成数据的高度逼真性和数据处理算法的实时性而得到了最广泛的应用,因此本文在对这4种方法进行综述分析之后,要着重分析运动捕获数据驱动方法中的各种典型技术。

2 3 维人体运动合成方法分类

手工方法不仅包括先用手动来设置每个关键帧中人体关节的自由度,然后通过插值来生成连续人体运动的方法,还包括为了合成特定运动而专门设计的算法^[1-2]。这些算法虽比较简单,且计算效率

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60533080)

收稿日期:2007-06-29;改回日期:2007-07-23

第一作者简介:王鑫(1984~),男,现为浙江大学计算机科学与技术专业博士研究生。主要研究方向为虚拟人技术、群体行为动画。

E-mail: wxy2001@163.com

高,但是每生成一种新运动就需要专门设计一个新算法,并且合成运动的细腻和逼真程度也比不上运动捕获设备得到的数据。

基于物理的方法^[3-5]的想法来源于:既然真实的人体运动都是符合物理定律的,那么借鉴生物力学的研究方法就可先得到人体各个部分的质量分布;然后根据牛顿定律就可以在各个关节的转矩和关节的运动轨迹之间建立一个常微分方程组;最后通过对这个常微分方程组求解就可以得到各个关节的运动轨迹,进而得到整个人体运动。基于物理的方法碰到最大的困难在于为了产生特定的运动,其所需的运动方程是难以设计的,并且即使运动方程产生了特定的运动,而这些完全符合物理定律的运动往往也是缺乏细节和没有个性的。

基于视频数据的方法^[6]是先利用计算机视觉中的轮廓跟踪、特征提取等技术,从不同角度拍摄的视频数据中提取出人体运动特征;然后一方面可以从这些特征中恢复出人体各个关节的 3 维运动信息,从而合成整个人体的 3 维运动^[7],另一方面也可以运用这些特征,并采用基于视频的绘制技术来复原出整个人体在 3 维空间中每一帧的空间姿态。在后一种情况下,一般不考虑各个关节的运动信息,这些复原出的 3 维人体运动数据可以先分成小的运动片段,然后通过对这些运动片段进行重新组合就可以合成新的运动^[8]。基于视频数据的方法总体上

可以分为自顶向下的方法和自底向上的方法^[9]两类。

数据驱动的运动合成方法主要是指对已有的 3 维人体运动数据通过做各种重来来生成新的运动的方法。人体运动数据主要来源于运动捕获仪器得到的原始数据,但是不仅仅限于运动捕获数据,手工方法和基于物理方法得到的人体运动数据都可以作为数据驱动方法的输入数据,甚至数据驱动方法的输出运动数据也可以作为输入。对运动数据的重用方法有很多种,比如,①在较低层次上,运用信号处理的方法对单个关节、单个自由度的运动数据进行运动编辑;②在较高层次上对一段运动所表现的情感进行调整;③将多个短运动片段连接起来组成一段新的较长的运动片段;④从多个运动片段中提取一些共性运动;⑤从人体部分关节运动信息中恢复出人体所有关节的运动信息;⑥或者基于物理定律对运动数据做一些修改等。

表 1 是 4 类方法的优缺点比较。这 4 种方法尽管在解决问题的思路存在着根本的区别,但是由于各种方法各有优缺点,所以在实际应用中,根据需要经常将这 4 种方法混合使用,比如运动捕获数据驱动的方法和基于视频方法的混合^[10],运动捕获数据驱动的方法和基于物理的方法的混合^[11-12]等。

表 1 运动合成方法对比分析
Tab. 1 Compares the motion synthesis methods

运动合成方法	优 点	缺 点
手工方法	(1)对生成运动有最大的控制度 (2)可以用于除人类之外的动物的运动生成	费时费力,且对动画师经验要求很高
基于物理的方法	(1)大大减少了手工调整运动的时间 (2)对机械性、规律性强的运动生成结果较好 (3)能保证产生的运动符合物理规律 (4)可以用于除人类之外的动物的运动生成	(1)很难产生细腻的带有一定情感的运动,比如舞蹈、鬼鬼祟祟地运动 (2)产生的运动虽然符合运动规律,但是不够自然和真实 (3)计算复杂度高 (4)物理控制器构造困难
基于视频数据的方法	(1)数据采集方式简便 (2)设备费用低	(1)采集环境要求背景单一 (2)合成的运动数据可重用性较差 (3)从视频中提取的运动数据的精度相对于运动捕获数据要低
运动捕获数据驱动的方法	(1)可以产生逼真细腻的运动 (2)计算复杂度一般较低,可实时合成 (3)运动数据可重用性相对较强	(1)使用运动捕获设备造成的经济代价高 (2)一般仅适用于人体的运动生成

3 运动捕获数据的表示方法

运动捕获数据的具体存储格式虽然依不同

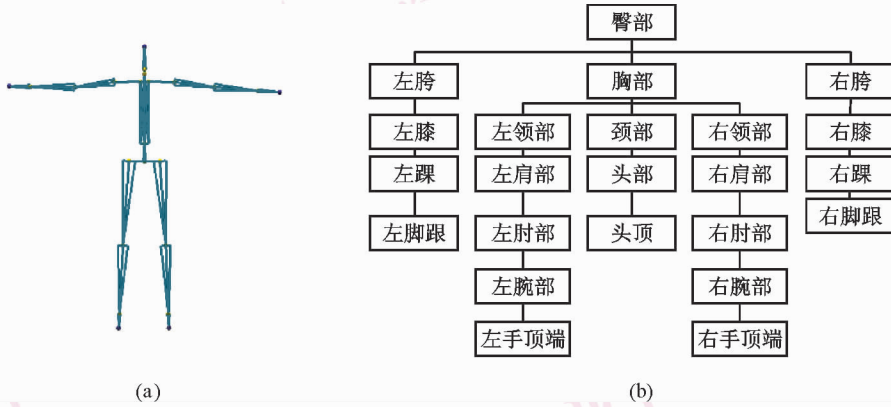


图1 人体骨架结构

Fig. 1 Human skeleton structure

骨架结构中的根关节记录了人体运动在世界坐标中的位移信息,其他关节记录着该关节相对于其父节点的平移和旋转信息。子关节相对于父关节的平移信息一般是一个固定值,因为它表示连接两个关节的骨头的长度。每一关节的空间信息变化都会影响其下层关节的空间位置。而整具骨架的移动则是以其根节点的平移来表示的,其他节点只作旋转。平移向量就是一般的3维空间向量,旋转可用旋转矩阵、欧拉角或四元数来表示。人体运动可由一离散时间向量函数 $m(t) = [p(t), q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ ($1 \leq t \leq T$) 表示,其中, $p(t) \in \mathbf{R}^3$ 表示根关节的平移信息, $q_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示第 i 个关节的旋转信息。

尽管一般意义上所指的运动捕获数据都是上述结构化的平移和旋转信息,但实际上各类运动捕获设备采集到的原始运动数据仍然需要经过相当多的处理步骤之后,才能得到上述的结构化信息^[13-15]。

另外,有些运动捕获数据中不仅仅包括人体运动数据,还包括对该人体运动数据的一些约束信息,这些约束信息表示其相关运动的某些属性,比如必须满足的物理约束(人的脚关节竖直位移不能低于地平面)、运动类型的特点(鼓掌欢呼运动中人的双手必须要接触多少次)等。这些约束信息可以被认为是人体运动数据的元数据,它可以给被指定给一帧、一个帧序列或者整个运动片段。

厂商的文件格式的不同而略有不同,但一般都是使用如图1(a)所示的骨架结构来表示人体的关节链,其各个关节以图1(b)所示的层次化结构连接起来。

4 运动捕获数据驱动的方法

尽管使用运动捕获设备已经可以得到细腻的人体运动数据,然而由于运动捕获设备昂贵、运动捕获过程费时费力、捕获结果很难满足预先要求等原因,因此运动捕获数据仍然需要进一步处理才能满足要求。基于上述原因,研究人员提出了很多运动编辑的方法。而这些运动编辑方法不仅可以作用于运动捕获数据,也适用于其他方法得到的运动数据。它们一般是通过对运动数据的某些属性进行修改来达到修改原始运动的目的,从而满足用户要求。但是运动编辑方法产生的运动和原始运动都是相似的、较短小的运动片段。

为了能够合成连续的、长时间的、满足特定约束条件的人体运动数据,近些年来,一些研究人员又提出了运动合成的概念。这种运动合成技术是先从运动片段中提取出运动基元;然后通过特定的数据结构(如运动图^[16],马尔可夫链^[17])将这些运动基元组织起来;最后根据用户提出的对所需运动的要求,通过搜索出合适的基元来合成新的运动。由于运动合成技术比运动编辑技术更加灵活,其生成的运动更加丰富,从而大大提高了对原始运动的利用率。

4.1 运动编辑技术

虽然运动捕获设备得到的运动数据比较逼真地

记录了表演者的运动,但是对已捕获的运动数据进行编辑却比较困难,主要原因有:(1)数据量庞大,为了连续地记录表演者的动作,要求运动捕获设备有很高的采样速率,一些光学运动捕获设备,其采样速率可达 1000 fps 以上,由于有如此高的速率,以致记录的数据量过于庞大,因此对其进行编辑也显得非常困难;(2)缺少结构化信息,传统的计算机动画技术是通过关键帧或者输入参数来控制最后生成的动画。但是运动捕获得到的只是一堆原始数据,而

这样的数据既无法给出运动的特征,也不知道如何进行修改才能有效影响这些数据所表示的运动;(3)对运动数据的某些属性进行修改之后,往往会改变其他不应该被修改的运动属性。

基于这些原因,运动编辑技术主要解决的问题就是如何高效地按照要求修改运动数据某一方面的属性,而不改变其他的属性。现有的运动编辑技术可按照其修改运动属性的不同来进行分类(如表 2 所示)。

表 2 运动编辑技术分类

Tab. 2 Categorizes the motion editing methods

运动属性	用于解决的问题	相关工作
运动缺陷	去掉对运动数据编辑之后经常会出现的脚步滑动问题	文献[19]
运动约束	基于特定运动修改需求(约束集形式)的运动编辑算法	文献[20]、[21]
运动路径	对运动路径进行修改	文献[22]、[23]
骨架结构	将基于一个骨架的运动应用到另外一个不同结构的骨架上(拓扑结构相同或者不同)	文献[24]~[29]
多层次运动细节	将运动数据作为信号来处理,使用信号处理技术在不同细节层次上对运动进行编辑	文献[30]、[31]
物理属性	结合动力学约束和能量定律对运动进行编辑	文献[32]
运动情感	将从运动中提取的情感、情绪等信息应用到另外一个运动上	文献[33]

4.2 运动合成技术

早在 1996 年就有研究者提出了基于例子的运动合成方法^[18],不过这个例子中虚拟人的自由度只有 5 个,而近些年来的人体运动合成技术已经进展到可以合成多自由度(比如图 1 中 70 多个)、精细的人体运动。各种运动合成技术,从总体上讲都具有图 2 所示的概要流程,即首先对原始的运动片段

进行特征分析,然后利用单个运动片段本身和多个运动片段之间的特征来构建一个运动数据库,这个运动数据库的结构是经过良好设计的,它不仅可以提供接口给用户表述需求,并可以根据用户需求在数据库中执行运动查询、运动连接、运动平滑等各种运动编辑操作,最终即可得到满足用户要求的运动数据。

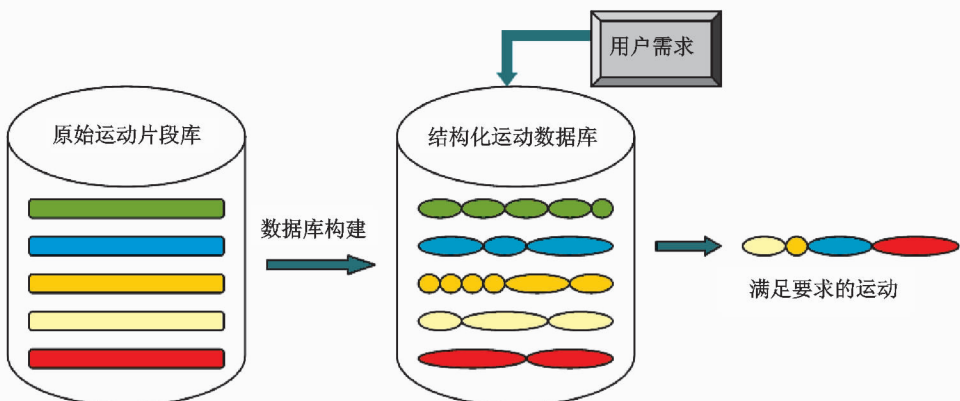


图 2 运动合成概要流程

Fig. 2 General process used in motion synthesis method

目前典型的运动合成方法大致上可以分为基于图结构的运动合成和基于统计模型的运动合成两种。这两种方法之间没有绝对的分界线,如基于图结构的运动合成方法中的某一步很可能也使用到统计的概念,而且基于统计模型的运动合成模型中也可能就存在着类似于图的数据存储结构。

4.2.1 基于图结构的运动合成

基于图结构的运动合成方法在游戏行业运用得较早^[34],而且这些图结构的构造过程一般是首先由设计师细致地设计基本运动片段;然后使用交互式软件工具产生这些运动片段的连接运动;最后将这些原始的运动片段和连接的运动片段通过一个手工设计的图结构^[35]连接起来。通过这种方法得到运动图结构良好,并可以实时地按照运动要求指令,在图上搜索得到所需的运动,而且这些图顶点之间的连接都是简易的,只要满足游戏人物的运动控制需求即可。近些年来,一些研究人员就如何自动化地构造运动图提出了各种方法。其中代表性的工作是 Arikan 等人 and Kovar 等人,以及 Lee 等人在 2002 年分别提出的方法^[16-17,36]。

这 3 项工作的大体思路是相同的,都是首先找到一组运动数据片段之间相似点的集合;然后在相似点之间,通过构造过渡运动片段来构造出一个运动图;最后在图上进行搜索,即可得到满足要求的运动。这 3 项工作的不同之处在于以下 4 个步骤(方面):运动相似点的检测;过渡性运动片段的生成;图的构造方法;满足目标的图搜索。

(1) 运动相似点的检测

该步需解决的问题是如何评价任意两帧所代表的运动的相似程度,以便决定是否应该在两帧之间添加一条过渡性的运动片段。

3 项研究工作都是在考虑了人体关节的位置、运动速度、运动加速度等因素的基础上,设计了不同运动的两帧之间的运动相似性评价公式。在这些评价公式中,都是根据人眼对人体运动敏感区域的分布规律,经验化地设置了与不同关节对应的权值,比如在 Lee 等人的研究工作中^[17],就将肩部、肘部、臀部、膝部、胸部这些部位的关节对应的权值设定为 1,而将颈部、踝部、脚趾、腕部这些部位的关节对应的权值设定为 0。

(2) 过渡性运动片段的生成

该步需解决的问题是如果已经确定了要在两帧之间添加一条边,那么如何产生一段过渡性的运动

片段,使得这个运动片段可以平滑地将第 i 帧之前的运动和第 j 帧之后的运动连接起来。

Arikan 等人的研究没有在与原始的运动片段之间产生过渡性的运动片段,而是在与各个关节对应的信号连接处(往往会出现一阶的不连续)通过做一个基于局部信息的信号平滑^[36]来得到较光滑运动信号。

Kovar 等人则是使用线性插值,在第 i 帧前的运动片段和第 j 帧后的运动片段之间做根关节位置的线性插值和关节朝向的四元数球面线性插值,并且将约束作为二元信号来加到产生的过渡运动片段上面^[16]。

Lee 等人则是使用层次性运动拟合算法^[20],并且根据约束存在区间相对过渡性运动片段区间的不同,先分成 4 种情况,然后根据不同情况分别考虑过渡性运动片段所采用的约束保持策略来生成过渡性的运动片段。

(3) 图的构造方法

Arikan 等人是先将原始的一个运动片段作为一个节点,然后通过定义好的相似性函数在其值高于某个阈值的两帧之间建立一条连接边,由于原始运动数据中的连续两帧之间的相似性一般都很高,所以相似性值的结果分布^[36]会聚集成区域块(如图 3(a)所示),也就是一个聚集区域所对应的很多条边可以通过聚类的方法用一条边来表示,还可以使用二叉树来从粗到细地将两段原始运动片段之间的连接关系表示出来,从而构建出一个层次化的运动图。在该层次化运动图中,不仅每层运动图的节点相同,而且下层图中的两条边还可合成为上层图中的一条边。

Kovar 等人在文献[16]中先使用边表示运动片段,其中节点表示运动片段进行连接的选择点,然后通过将节点插入到原始运动数据段中来将其分为很多条边,并且在两个节点之间使用 motion blending 方法来插入新的过渡性边,从而构造出一个运动图(如图 3(b)所示)。

Lee 等人在文献[17]中将运动图结构分为两层,其中低层表示人体运动的细节性,高层表示人体运动的概要性。低层是由很多节点和连接边构成的运动图结构,其中原始运动数据的每一帧就是一个节点,而且原始运动中的相邻帧之间必定存在一条边,相似点之间可能也存在一条边。高层是由基于统计特性的很多图节点聚类之后的图结构,一个高层节点代表了一大类相似的人体姿态,而且每一个高层节点都对应一棵以自己为根节点的树结构。这

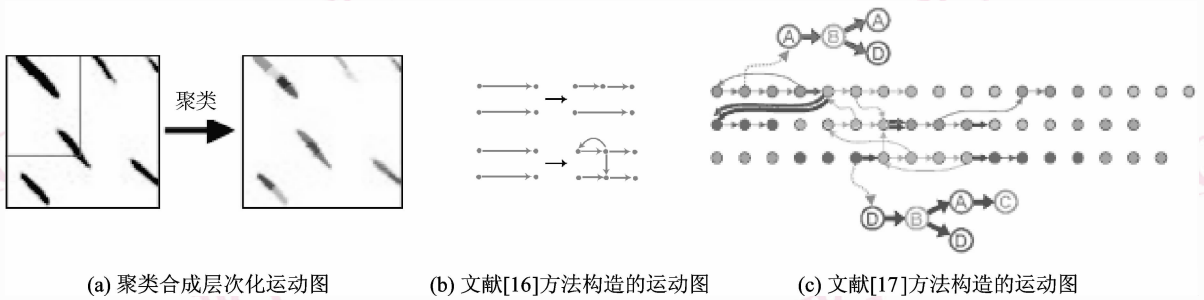


图 3 3 种运动图的构造方法

Fig. 3 Three different motion graphs constructing methods

个树结构关联了该高层节点所代表的所有底层节点(如图 3(c)所示)。

(4) 满足目标的图搜索

Arikan 等人在文献[36]中使用了随机搜索的方法,即首先在最高层,也就是在最粗糙的图结构上进行随机搜索,同时记录下正在进行搜索的路径和可能发生突变的地方,然后对可能发生突变的地方进行突变,并比较突变后的路径和之前的路径满足约束的情况,如果突变后的路径更好,就保留这条突变之后的路径,重复上述过程,直到没有更好的路径被找到,即可得到最终的运动路径。

Kovar 等人在文献[16]中先通过定义一个目标函数,然后使用分支定界法通过在图上进行搜索来得到使目标函数最优的一条路径作为最终的运动路径。

Lee 等人在构造好的高层聚类树上,首先根据用户需要确定一条高层路径 p ; 然后在所有的对应路径 p 的底层节点序列 s 之间寻找一个对应条件概率分布最大的路径作为最终的运动路径^[17]。

4.2.2 基于统计模型的运动合成

基于统计模型的运动合成方法中具有代表性工作有:

Matthew 等人将人体运动的风格表示为将 qualitative states 映射到 quantitative observation 时的 variations,再结合 cross entropy minimization, annealing 等自动学习方法就可构建出一个通用的人体运动状态机^[37],还可以使用参数来控制该状态机,以产生不同风格的运动。

Tanco 等人提出的系统^[38]可以产生任意指定的两个关键帧之间的过渡性运动,并可通过聚类的方法得到产生的 Markov 链的各个状态,而和各个状态相关的原始运动捕获数据则可作为对应于每个状态

的隐含状态。如此一来,在合成运动的时候,即可首先在第 1 层得到待合成运动的概略表示,然后第 2 层使用第 1 层产生的概略表示,通过在原始运动捕获数据中进行采样来得到最后的运动序列。Matthew, Tanco 等人的研究工作中^[37-38]都采用了一个两层的隐马尔可夫模型(HMM)来表示运动数据。

Li 等人使用了线性动态系统(linear dynamic system)来表示一个运动的局部动态性,并使用在这些 linear system 之间的跳变来表示全局的动态性^[39]。在文献[39]中提出了一个叫做 motion texton 的概念,一个 motion texton 就是一个线性动态系统,该 motion texton 在具体的运动序列中对应着很多实例。可先通过最大似然估计的方法来得到这些 motion texton 和它们对应的分布;然后使用这些学习到的 motion texton 和它们的分布就可以进行运动的合成。

Hsu 等人将人体运动中的风格从两段主体内容相似而风格不同的输入和输出运动中表示出来,并且使用线性时不变系统来表示^[40],如果一旦建立好了特定的线性时不变系统,那么就可以使用这个线性时不变系统对一个输入运动进行作用,从而得到想要的特定风格类型的人体运动。

Pullen 等人提出,首先从运动数据中得到关节角度和平移等时间信号;然后使用小波变换将这些时间信号分解到不同的频带上,再使用核密度来表示不同频带信息之间的相关性;最后在这些表示好的密度信息中采样,并采用迭代寻优的方法来保证最后生成的运动数据的平滑性^[41]。该方法在运动复杂性较小的小袋鼠运动合成上取得了好的效果,但是该方法只能应用在周期性运动的合成(如走、跑等),并且该方法只是在较低的自由度上做了验证,当推广到整个人体的高自由度运动的时候,其效

果如何还有待进一步验证。

Bowden 将用于可变形物体的表示和识别的点分布模型推广到运动数据表示的人体形状变化和各个关节的基于时间的状态数据变化^[42]。然后从训练数据中学习好的点分布模型,即可以用来做人体运动的合成、检测,识别等工作。

在使用隐马尔可夫模型来编码高阶的时间依赖性时,还存在着一些困难,比如当使用迭代寻优的方法去训练 HMM 的时候,经常会陷入局部最优,这样就使得最终得到的模型的拓扑结构和大小都不能很好地反映训练数据中包含的规律。Galata 等人针对这种问题,提出采用 VLMM (variable-length Markov model) 来表示数据之间的依赖和约束^[43],由于这种 VLMM 可以高效地表示长短两种时间段上的依赖关系,因此使用学习好的 VLMM 就可以产生和预测人体运动。虽然学习好的 VLMM 确实可以产生逼真的人体运动,但是用户指定了开始动作之后,就无法控制后续合成动作的内容。

Jenkins 等人对 ISOMAP 算法进行了扩展^[44],即先加入了时空约束关系;然后对手工分好段的运动数据片段进行降维操作,并从中提取出人体运动的基本运动模块,该模块相当于文献[35]中的动词;最后对提取出的人体运动基本运动元素再进行一次改进的 ISOMAP 操作,即得到元层次上的行为模块,该模块相当于文献[35]中的副词。在得到这两个模块之后,再由用户选择一些元层次上的行为,系统就可以根据这些行为合成所需运动。从基本行为出发来合成运动的方法早在文献[1]中就已经提出,但是在 Jenkins 等人的工作中,自动化了提取运动词汇的过程^[44]。该研究的局限性在于,用户只能合成提取出元层次行为范围内的运动。

总体上说,文献[41]~文献[43]中涉及到的运动合成工作都是作为人体跟踪、姿势识别等目标的中间环节,而不是为了合成逼真的人体运动,因此合成的人体运动往往比较粗糙。

4.2.3 其他的基于运动捕获数据的运动合成方法

除了基于图结构和统计模型之外,还有一些其他的基于运动数据的运动合成方法,比如在文献[45]中让用户首先设定一些初始的运动关键帧,接着将这些运动关键帧分割为很多单调的曲线段;然后在预先分割好的运动数据库中,对每一个曲线段进行曲线匹配;最后将与每一段最匹配的运动数据库中的运动片段连接起来,就不仅得到了满足用户输入

的关键帧约束,而且具有丰富细节的运动。

5 总结和展望

3 维人体运动合成技术在近十几年来取得了飞跃性的发展,尽管运动捕获设备和数据处理算法日益成熟,但是人体运动数据处理方面仍然有很多需要解决问题和新的研究方向,其主要有:

(1) 运动数据库组织

虽然前边所述的各种运动合成技术都设计了如何将人体运动数据结构化地存储下来的方法,但使用这些方法所构成的运动数据库结构往往不够良好,还需要数据库设计人员通过繁琐的手工调整之后才能取得良好的结构。然而对运动数据库进行手工调整往往只能保证产生的局部运动数据的质量较好,而整个运动数据库中的运动数据类型是否足够多,及合成的运动范围是否足够大,这些运动数据库的整体性能评价方法仍需要进一步探索研究。

(2) 运动数据库的压缩

运动数据压缩主要解决的问题是,如何在减少运动数据储存容量的同时,不降低运动数据的质量,一个直观的想法就是先从运动捕获数据中提取出关键帧,然后从这些关键帧中复原出原始的运动数据,虽然国内外研究人员也提出了一些方法^[46-49],但这些方法的性能都有待进一步提高。

(3) 运动数据库的检索

运动数据的搜索方法一般可以分为以下两种:
①基于元数据的搜索,虽然这种搜索方法相对较为简单,不仅搜索速度快,且搜索结果的好坏取决于原始标注元数据的质量,但该方法不仅费时,且主观的元数据标注过程限制了这种搜索方法的应用;
②基于自动化数据相似性比较的搜索,这种方法的基础是存在一个可以很好定义的媒体数据之间相似性的函数。由于其可以在该相似性函数的基础上建立运动数据之间的相似性关系,从而可实现运动数据的检索。而目前主要的研究热点难点^[50-53]都在于第2类方法。

(4) 运动数据质量评价

各种运动合成技术最后得到的运动数据是否足够自然、完整、简洁(没有冗余和噪声),一般都需要动画师通过肉眼观察来做出相应判断。可是在运动数据众多,或者结果运动数据需要实时地应用于虚拟环境时,通过动画师的手工劳动来判断运动数据

质量变得困难,甚至于不可能。虽然已有一些研究人员提出了自动化的运动数据评价方法^[54-57],但 these 方法大都只能针对特定的运动类型,或者性能有限。

(5) 群体运动合成

一般的运动合成技术主要是针对单个角色的合成,当涉及到多个角色合成的时候,运动合成任务就由量变发生了质变,在合成和控制群体运动时,就必须考虑群体行为、路径规划、碰撞检测等问题。群体运动合成是近几年的研究热点,并取得了一定的成果^[58-60]。

(6) 人体运动合成的新思路

近几年来,在人体运动合成方面出现了一些有别于本文前边归类的 4 种方法的新思路,比如 Park 等人提出通过直接捕获人体皮肤表面的运动信息来重构人体运动的方法^[61],Chai 等人提出了将低维人体运动的控制信号和运动捕获数据库相结合,用来合成人体运动的方法^[62]。

(7) 反映跟随性人体动画合成

反映跟随性人体动画合成,其主要解决的问题是对于外界不可预料的干扰性事件,如何通过控制虚拟人来产生逼真的反应性运动。已经有几种数据驱动和物理模拟相结合的方法被提出,用于解决这类问题^[63-65]。

总体而言,国内学者在 3 维人体运动合成与编辑技术领域开展的研究起步较早,研究方法和趋势一直保持与国际接轨,并取得了一定的研究成果。其中具有代表性的研究有庄越挺带领的研究小组在基于视频的运动合成^[7]、运动数据检索^[51]、运动数据关键帧提取^[47]、群体运动合成^[66]等方面的工作;王兆其带领的研究小组在运动编辑^[67]、运动重定向^[29]、运动数据评价^[68]等方面的工作;以及潘志庚等人在反应跟随动画合成方面的工作^[64],耿卫东等人在中华传统武术动作合成方面的工作^[69],马利庄等人在运动路径编辑方面的工作^[23],孙守迁等人在运动数据压缩方面的工作^[46]。

参考文献 (References)

- 1 Perlin K, Goldberg A. Improv: a system for scripting interactive actors in virtual worlds [A]. In: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996: 205-216.
- 2 Chi D, Costa M, Zhao L, et al. The EMOTE model for effort and shape [A]. In: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 173-182.
- 3 Hodgins J K, Wooten W L. Animating human athletes [A]. In: Proceedings of the Eighth International Symposium on Robotics Research [C], Berlin, Germany, 1998: 356-367.
- 4 Fang A C, Pollard N S. Efficient synthesis of physically valid human motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 417-426.
- 5 Faloutsos P, Panne M, Terzopoulos D. Composable controllers for physics-based character animation [A]. In: Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], Los Angeles, California, USA, 2001: 251-260.
- 6 Carranza J, Theobalt C, Magnor M A, et al. Free-viewpoint video of human actors [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 569-577.
- 7 Luo Zhong-xiang, Zhuang Yue-ting, Pan Yun-he, et al. Incomplete motion feature tracking algorithm in video sequences [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(6): 730-735. [罗忠祥,庄越挺,潘云鹤等. 视频中不完全运动特征的跟踪算法研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(6): 730-735.]
- 8 Starck J, Miller G, Hilton A. Video-based character animation [A]. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Los Angeles, California, USA, 2005: 49-58.
- 9 Li Hao-jie, Lin Shou-xun, Zhang Yong-dong. A Survey of Video Based Human Motion Capture [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(11): 1645-1651. [李豪杰,林守勋,张勇东. 基于视频的人体运动捕获综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(11): 1645-1654.]
- 10 Ren L, Shakhnarovich G, Hodgins J K, et al. Learning silhouette features for control of human motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(4): 1303-1331.
- 11 Liu C K, Hertzmann A, Popovic Z. Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 1071-1081.
- 12 Safonova A, Hodgins J K, Pollard N S. Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 514-521.
- 13 Bodenheimer B, Rose C, Rosenthal S, et al. The process of motion capture: dealing with the data [A]. In: Computer Animation and Simulation '97 [C], Budapest, Hungary, 1997: 2-16.
- 14 O'Brien J, Bodenheimer B, Brostow G, et al. Automatic joint parameter estimation from magnetic motion capture data [A]. In: Proceedings of Graphics Interface [C], Montreal, Quebec, Canada, 2000: 53-60.
- 15 Zordan V B, Horst N C V D. Mapping optical motion capture data to skeletal motion using a physical model [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], San Diego, California, USA, 2003: 245-250.
- 16 Kovar L, Gleicher M, Pighin F. Motion graphs [J]. ACM Transactions

- on Graphics, 2002, **21**(3):473-482.
- 17 Lee J H, Chai J X, 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.
- 18 Lamouret A, Panne M V D. Motion synthesis by example [A]. In: *Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation '96*[C], Poitiers, France, 1996: 199-212.
- 19 Kovar L, Schreiner J, Gleicher M. Footskate cleanup for motion capture editing [A]. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*[C], San Antonio, Texas, USA, 2002:97-102.
- 20 Jehee L, Sung Yong S. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures [A]. In: *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* [C], Los Angeles, California, USA, 1999:39-48.
- 21 Gleicher M. Motion editing with spacetime constraints [A]. In: *Proceedings of the 1997 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics* [C], Providence, Rhode Island, USA, 1997:139-148.
- 22 Gleicher M. Motion path editing [A]. In: *Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Interactive 3D graphics*[C], Chapel Hill, North Carolina, USA, 2001:195-202.
- 23 Chen Zhi-hua, Ma Li-zhuang, Li Zhong, *et al.* Editing human motion path [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, **18**(5):651-655. [陈志华, 马利庄, 李众等, 人体运动路径的编辑算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, **18**(5): 651-655.]
- 24 Gleicher M. Retargeting motion to new characters [A]. In: *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* [C], Orlando, Florida, USA, 1998: 33-42.
- 25 Tak S, Ko H S. A physically-based motion retargeting filter [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(1): 98-117.
- 26 Baciú G, Iu B K C. Motion retargeting in the presence of topological variations [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2006, **17**(1):41-57.
- 27 Baek S, Lee S, Kim G J. Motion retargeting and evaluation for VR-based training of free motions [J]. *Visual Computer*, 2003, **19**(4): 222-242.
- 28 Monzani J S, Baerlocher P, Boulic R, *et al.* Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargeting [J]. *Computer Graphics Forum*, 2000, **19**(3):11-19.
- 29 Yang Chang-shui, Wang Zhao-qi, Gao Wen, *et al.* Skeleton building of individual virtual human model [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, **16**(1):67-72,78. [杨长水, 王兆其, 高文等. 个性化虚拟人体模型骨架生成方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, **16**(1):67-72,78.]
- 30 Bruderlin A, Williams L. Motion signal processing [A]. In: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* [C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996:97-115.
- 31 Andrew W, Zoran P. Motion warping [A]. In: *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* [C], Los Angeles, California, USA, 1995: 105-108.
- 32 Zoran P, Andrew W. Physically based motion transformation [A]. In: *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*[C], Los Angeles, CA, USA, 1999:11-20.
- 33 Unuma M, Anjyo K, Takeuchi R. Fourier principles for emotion-based human figure animation [A]. In: *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* [C], Los Angeles, California, USA, 1995:91-96.
- 34 Mizuguchi M, Buchanan J, Calvert T. Data driven motion transitions for interactive games [A]. In: *Eurographics Short Presentations* [C], Manchester, UK, 2001.
- 35 Rose C, Cohen M F, Bodenheimer B. Verbs and adverbs: multidimensional motion interpolation [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1998, **18**(5): 32-40.
- 36 Arikan O, Forsyth D A. Interactive motion generation from examples [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 483-490.
- 37 Matthew B, Aaron H. Style machines [A]. In: *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*[C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 193-192.
- 38 Tanco L M, Hilton A. Realistic synthesis of novel human movements from a database of motion capture examples [A]. In: *Proceeding of IEEE Workshop on Human Motion 2000*[C], Austin, Texas, USA, 2000:137-142.
- 39 Li Y, Wang T S, Shum H Y. Motion texture: a two-level statistical model for character motion synthesis [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3):465-472.
- 40 Hsu E, Pulli K, Popovic J. Style translation for human motion [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3): 1082-1089.
- 41 Pullen K, Bregler C. Animating by multi-level sampling [A]. In: *Proceedings of the Computer Animation* [C], Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2000:36-42.
- 42 Bowden R. Learning statistical models of human motion [A]. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Human Modeling, Analysis, and Synthesis*, [C], Hilton Head Island, South Carolina, USA, 2000.
- 43 Galata A, Johnson N, Hogg D. Learning variable-length Markov models of behavior [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, **81**(3):398-413.
- 44 Jenkins O C, Mataric M J. Automated derivation of behavior vocabularies for autonomous humanoid motion [A]. In: *Proceedings of the ACM Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems* [C], Melbourne, Australia, 2003:252-232.
- 45 Pullen K, Bregler C. Motion capture assisted animation: texturing and synthesis [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 501-508.
- 46 Shen Jun-xing, Sun Shou-qian, Pan Yun-he. Key-frame extraction from motion capture data [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, **16**(5), 719-723. [沈军行, 孙守迁, 潘云鹤. 从运动捕获数据中提取关键帧[J]. *计算机辅助设计与*

- 图形学学报, 2004, **16**(5):719-723.]
- 47 Xiao Jun, Zhuang Yue-ting, Yang Tao, *et al.* An efficient keyframe extraction from motion captures data [A]. In: Proceedings of 24th Computer Graphics International Conference [C], Hangzhou, China, 2006: 494-501.
- 48 Arikan O. Compression of motion capture databases [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, **25**(3): 890-897.
- 49 Liu Guo-dong, Zhang Jing-dan, Wang Wei, *et al.* A system for analyzing and indexing human-motion databases [A]. In: Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data [C], Baltimore, Maryland, USA, 2005: 924-926.
- 50 Kovar L, Gleicher M. Automated extraction and parameterization of motions in large data sets [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, **23**(3): 559-568.
- 51 Liu Feng, Zhuang Yue-ting, Wu Fei. 3D motion retrieval with motion index tree [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, **92**(2-3): 265-284.
- 52 Forbes K, Fiume E. An efficient search algorithm for motion data using weighted PCA [A]. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Los Angeles, California, USA, 2005:67-76.
- 53 Muller M, Roder T, Clausen M. Efficient content-based retrieval of motion capture data [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, **24**(3): 677-685.
- 54 Ren L, Patrick A, Efros A A, *et al.* A data-driven approach to quantifying natural human motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, **24**(3): 1090-1097.
- 55 Harrison J, Rensink R A, van de Panne M. Obscuring length changes during animated motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, **23**(3):569-573.
- 56 Hodgins J K, O'Brien J F, Tumblin J. Perception of human motion with different geometric models [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, **4**(4):307-316.
- 57 Reitsma P S A, Pollard N S. Perceptual metrics for character animation: sensitivity to errors in ballistic motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, **22**(3): 537-542.
- 58 Srinivasan M, Metoyer R A, Mortensen E N. Controllable real-time locomotion using mobility maps [A]. In: Proceedings of the 2005 Conference on Graphics Interface [C], Victoria, British Columbia, Canada, 2005:51-59.
- 59 Sung M, Kovar L, Gleicher M. Fast and accurate goal-directed motion synthesis for crowds [A]. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Los Angeles, California, USA, 2005:291-300.
- 60 Lai Y C, Chenney S, Fan S H. Group motion graphs [A]. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Los Angeles, California, USA, 2005: 281-290.
- 61 Park S I, Hodgins J K. Capturing and animating skin deformation in human motion [J]. ACM Transaction on Graphics, 2006, **25**(3): 881-889.
- 62 Chai J X, Hodgins J K. Performance animation from low-dimensional control signals [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, **24**(3): 686-696.
- 63 Shapiro A, Pighin F, Faloutsos P. Hybrid control for interactive character animation [A]. In: Proceedings of the IEEE 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications [C], Washington, DC, USA, 2003:455-462.
- 64 Tang Bing, Pan Zhi-geng, Zheng Le, *et al.* Interactive generation of falling motions [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2006, **17**(3-4), 271-279.
- 65 Zordan V B, Majkowska A, Chiu B, *et al.* Dynamic response for motion capture animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, **24**(3): 697-701.
- 66 Liu Feng, Zhuang Yue-ting, Luo Zhong-xiang, *et al.* Group animation based on multiple autonomous agents [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, **41**(1):104-110. [刘丰, 庄越挺, 罗忠祥等. 基于多自主智能体的群体动画创作[J]. 计算机研究与发展, 2004, **41**(1):104-110.]
- 67 Liu Li, Wang Zhao-qi, Zhu Deng-ming, *et al.* Motion editing based on the reconstruction of constraint trajectory [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, **18**(10): 1613-1618. [刘莉, 王兆其, 朱登明等. 基于运动轨迹重构的运动编辑[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, **18**(10): 1613-1618.]
- 68 Wei Yi, Xia Shi-hong, Zhu Deng-ming. A robust method for analyzing the physical correctness of motion capture data [A]. In: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology [C], Limassol, Cyprus, 2006:338-341.
- 69 Geng Wei-dong, Huang Yan, Pan Yun-he. Step/stance planning and hit-point repositioning in martial arts choreography [A]. In: Proceedings of 17th International Conference on Computer Animation & Social Agents [C], Geneva, Switzerland, 2004:95-102.