

# 多角色与虚拟场景的运动融合\*

罗忠祥<sup>†</sup>, 庄越挺, 潘云鹤, 李岳梅

(浙江大学 计算机科学与工程系, 浙江 杭州 310027)

## Multiple Characters Motion Fusion with Virtual Scene

LUO Zhong-Xiang<sup>†</sup>, ZHUANG Yue-Ting, PAN Yun-He, LI Yue-Mei

(Department of Computer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+Corresponding author: Phn: 86-571-87951903, E-mail: zdlzx@263.net

<http://ai.zju.edu.cn/%7Eyzhuang/>

Received 2001-10-18; Accepted 2001-12-18

Luo ZX, Zhuang YT, Pan YH, Li YM. Multiple characters motion fusion with virtual scene. *Journal of Software*, 2003,14(3):635~642.

**Abstract:** In the computer animation based on motion capture, most of the available approaches to edit motion only deal with single character motion, which are mostly planned beforehand. Thus, characters lack the capability of responding to the environments. To improve the characters' ability to sense and respond to the environment, collaborate with each other, a new concept of motion fusion, which fuses multiple single-character motions captured in the structured environment into one unstructured virtual one, is presented in this paper. Based on the architecture of multi-character motion fusion with virtual scene which covers motion decision, motion collaboration, motion solving and motion execution, the key issues such as motion capture, planning, collaboration and generation of continuous movement and discrete movement are discussed in detail in this paper. The experimental results demonstrate that the presented method can efficiently fuse the motion of characters with virtual scenes. The independent collaboration of animated characters and high reuse enable the application of the presented idea into computer animation and game.

**Key words:** computer animation; motion capture; motion editing; motion synthesis; collaboration

**摘要:** 在基于运动捕获的计算机动画中,已提出的各种运动编辑的方法大都针对单个角色运动进行处理,而且角色的运动多数是事先规划好的,缺乏对外界环境变化的响应能力。为了提高角色对环境的感知、响应能力以及角色间的自主协同能力,提出将多个结构化环境下捕获的单角色运动融合到同一个非结构化虚拟环境下的“运动融合”的新概念和方法,并根据运动决策、运动协调、运动求解和运动执行的体系结构对运动规划、多角色协同、离散运动模式决策和连续运动姿势生成等关键问题进行了深入研究。实验结果表明,提出的方法能够真正有效地实现同一场景下角色与场景协调的运动融合。动画角色的高自主性和运动捕获数据的高重用性使得

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69803009 (国家自然科学基金); the Assisting Project of Ministry of Education of China for Backbone Teachers of University and College (国家教育部高等学校骨干教师资助计划); the Foundation of Ministry of Education of China for Excellent Young Teachers (教育部优秀年轻教师基金)

**第一作者简介:** 罗忠祥(1976—),男,湖南浏阳人,博士生,主要研究领域为网络多媒体计算技术。

提出的方法在计算机动画和游戏中具有普遍的应用价值.

关键词: 计算机动画;运动捕获;运动编辑;运动合成;协同

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

在基于运动捕获的计算机动画中,由于运动捕获设备价格昂贵以及人体运动受到设备的限制,必须对运动捕获数据进行编辑,以提高数据的可重用性和再生出新的运动姿势.近年来,在运动编辑方面国内外学者进行了大量卓有成效的研究.主要的运动编辑方法包括:(1) 曲线拟合和调节控制顶点方法<sup>[1]</sup>,不适于变化比较大的运动;(2) 数字信号处理方法,适于重用和适配现存的运动数据<sup>[2,3]</sup>.如 Popvic 提出的运动变形(motion warping)思想,利用混合和重叠方法生成一组新运动<sup>[4]</sup>;Bruderlin 将运动看成信号,采用多分辨率运动过滤、时间变形、多目标运动插值、运动波形变换和运动位移映射等运动信号处理方法,对捕获的运动数据进行再生、修改和编辑,生成了各种意想不到的运动<sup>[5]</sup>;(3) 时空约束方法,适于生成各种交互运动<sup>[6,7]</sup>.该方法首先由 Michael 提出,它通过求解运动目标方程来生成满足各种时空约束条件的新运动<sup>[6]</sup>.Andrew 和 Popvic 采用时空约束动力学方程将原始运动变换为满足用户要求同时保持运动属性的新运动<sup>[8]</sup>.Rose 利用时空约束来解决运动的平滑过渡问题<sup>[9]</sup>.Lee 提出了结合曲线拟合与逆向运动学的分层求解方法,生成满足时空约束条件的新运动<sup>[10]</sup>.上述方法基本能满足现有的运动编辑对数据重用性的要求,但仅限于单角色的运动修改和再生,这样就忽略了一个问题:在计算机动画中,一个场景中会同时存在多个运动角色,因此不但需要解决单角色连续运动姿势的生成问题,而且更重要的是要使多个角色有序地协同工作.另外,由于原始运动通常都是在单一的结构化环境下捕获的,因而难以重定向到新的复杂动画场景中.本文提出非结构化的虚拟环境下“多角色运动融合”的思想和方法,能够通过提高角色的感知性和行为自主性有效地融合多角色运动.

## 1 多角色运动融合的体系结构

### 1.1 运动策略

如果我们将人体运动视为一个四层的思维-运动过程,则可以通过表 1 来类比动画师制作动画的过程.运动决策、运动协调、运动求解和运动执行层环环相扣,自上而下完成角色的运动规划、协同、求解和显示.

Table 1 The analogy of human movement and animated characters movement

表 1 人体运动与动画角色运动的类比

Layer	Movement	Animated character motion
Motion decision	Head decides movement path, communication and work in the process of movement.	Animator plans the path and function achieved by characters in the process of movement.
Motion collaboration	Analyze the result of motion decision, and then transmit analyzed results to next layer.	Analyze planned path and required function, collaborate the relation among characters, virtual scenes, and then achieve discrete motion decision in each path.
Motion solving	The person decide his position and orientation all the time.	Solve continuous movement pose and its position and orientation for each character based on collaboration.
Motion execution	Specific movement is achieved by limb.	Drive character to move using extracted motion data.

### 1.2 多角色运动融合的体系结构

根据上述对人体和动画角色运动策略的类比分析,我们提出多角色运动融合的体系结构(如图 1 所示).

(1) 在运动决策层,主要完成非结构化虚拟环境下的多角色路径的总体规划,然后分解为单个角色的路径规划,通过运动变换将运动捕获数据(详见第 2 节)覆盖到整个规划好的路径上.

(2) 在运动协调层,根据上层的结果,考虑使角色与虚拟环境以及角色间协同工作的时空约束条件,并采用有限状态机自主决策各角色在每段异构的路径上的运动模式.

(3) 在运动求解层,根据运动协调结果,采用连续运动生成方法和运动过滤方法生成各个角色在各段路径上的连续运动姿势.

(4) 运动执行层完成连续运动在动画角色上的重定向,生成多角色运动融合的动画.

在研究多角色运动融合时我们遇到两个挑战:(1) 自主规划非结构化虚拟环境下单角色的最优路径;(2) 在多角色的虚拟场景下进行离散运动的自主决策和连续运动求解.离散运动决策主要是根据场景来决定每个角色的运动模式,而连续运动求解是指求解在某种运动模式下该角色每个时刻的具体运动姿势.下面我们将对这些挑战的解决方案进行详细的讨论.

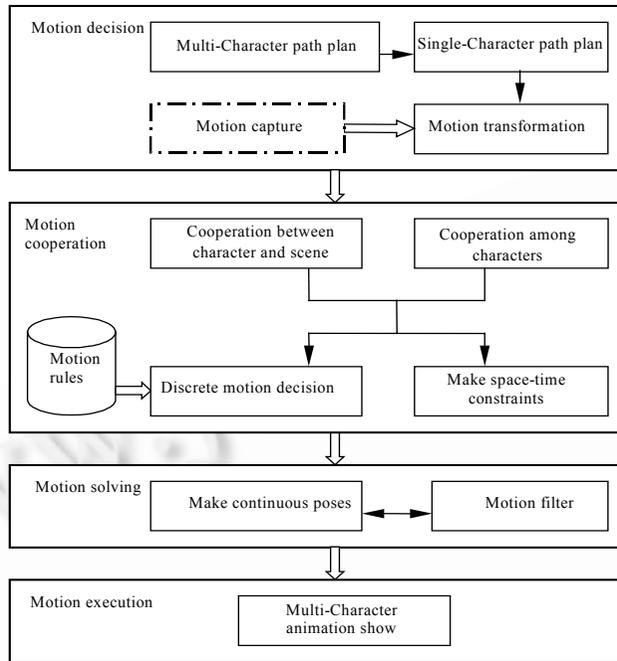


Fig.1 General architecture for motion fusion  
图 1 运动融合体系结构

## 2 基于视觉的运动捕获

由于运动捕获技术具有广泛的应用前景,目前对运动捕获的研究与开发都比较多.但是目前的研究仍然主要通过硬件设备来实现,这种系统通常非常昂贵,难以满足广大普通用户的需求,而且附在人体身上的特殊标记以及各种机械设备限制了演员的自由发挥,难以捕获比较复杂的人体运动.为了克服这些困难,我们试图开发一种利用视觉技术实现的运动捕获方法及软件系统.为了提取精确的三维人体运动,我们在系统中采用基于双像机的运动捕获方法.该系统的体系结构如图 2 所示,主要包括视频处理(视频解码与图像序列同步)、2D 特征跟踪、摄像机定标、三维重建、3D 数据滤波处理等功能.人体运动捕获涉及到人体运动表示、2D 特征跟踪、三维重建等关键问题.我们对其中的关键技术进行了深入研究,下面简要介绍这些关键技术,具体可参考文献[11].

在人体运动表示中,我们采用 16 个关节连接的骨架模型来描述人体,而人体运动简化为骨架模型中各个关节的运动.为此,我们设计了一套紧身衣.在衣服的各个关节处贴上不同颜色的色块,因此人体的运动跟踪简化为对图像序列中的色块进行跟踪.由于没有任何特殊标记和机械设备附着在身上,演员可自由表演各种需要的运动.

在 2D 特征跟踪中,主要难点集中在如何解决自遮挡、前景与背景之间缺乏对比等难点.为了解决这些问题,

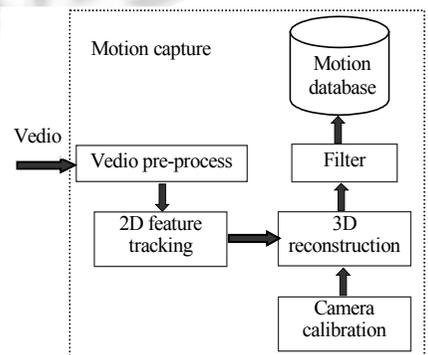


Fig.2 Motions capture  
图 2 运动捕获

我们提出了几种特征跟踪算法,根据不同的应用领域,可采用不同的策略来解决.

在三维特征重建中,我们采用非线性不共面的摄像机定标方法,然后根据三维重建结果和摄像机定标结果,采用考虑存在不确定性的三维重建方法可以精确地恢复出人体三维运动.

上述方法捕获的运动是采用三维坐标来表示的,而下面讨论的主要是采用旋转和平移表示的人体运动数据.因此,首先需要将三维运动转化为采用旋转和平移表示的人体运动,具体可参考文献[11].

### 3 路径规划和运动变换

#### 3.1 路径规划

在动画制作中,动画师可事先规定各个角色的运动路径,也可由系统在已知起点和目的地时自动进行路径规划.本文仅讨论自动路径规划中非结构化虚拟场景下的最优路径规划.我们借鉴机器人研究中提出的RPP(randomized path planning)方法的基本思想<sup>[12]</sup>,通过计算任意两个离散点之间的最短可行距离进行非结构化虚拟场景中的路径自动规划.具体实现方法为:

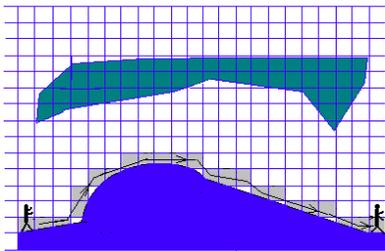


Fig.3 Grid of virtual scene  
图3 虚拟场景网格图

(1) 采用均匀分布的正交网格把虚拟场景分割成若干矩形单元组成的集合(如图3所示),集合中的单元如果至少有一半被虚拟环境占有则标记为“1”,否则标记为“0”.

(2) 利用虚拟场景网格图来计算相应点的距离映射,每个“0”单元记录从本单元  $P$  到包含目的地的单元的四连通遍历距离  $F(P)$ ,距离采用网格数来表示.

(3) 为了计算“0”单元到目的地的最短可行距离,我们采用梯度最速下降法来决定角色向目标移动的方向,其基本思想是:在八连通遍历中,对任意单元  $P$  以及遍历的“0”单元  $q$ ,首先计算位势  $F(P+q)$ ,然后计算位势的梯度下降方向  $R(P)=F(P)-F(P+q)$ ,在八连通遍历中,我们选择不存在冲突且使  $\|R(P)\|$  最大的  $q$  作为角色移动的方向,将  $q$  加入到集合  $Path$  中.如果  $q$  还不是目标单元,则继续搜索,直到搜索到  $q$  为目标单元为止,集合  $Path$  为规划的最优路径,如图3所示两个角色间箭头所表示的路径.

非结构化虚拟场景下的最优路径规划实现了随机路径的实时规划,提高了角色对场景的感知和应变能力.

#### 3.2 运动变换

为了将捕获的原始运动变换为规划后的运动轨迹上的运动,可先采用欧拉角和平移向量来描述原始的人体运动序列,然后通过周期拓展和偏移映射来覆盖整个运动轨迹.

##### (1) 运动序列描述

我们将人体看成是由16个关节连接的刚体集合,并将人体运动简化为人体骨架的运动,详细的人体模型参考文献[12].原始的人体运动序列的描述为

$$Q(t)=(q(t),p_0(t),\dots,p_n(t))=(q(t),p(t)),$$

其中  $q(t)$  表示运动参考点  $t$  时刻的平移向量,  $p_i(t)$  表示  $t$  时刻第  $i$  个关节的旋转角度向量.

##### (2) 运动周期拓展

捕获的运动通常是短距离的,一般都需要经过周期拓展才能覆盖整个运动轨迹.如果原始运动在一个运动周期  $T$  内的运动区间为  $Q(t)\sim Q(t+T)$ ,那么运动则应沿  $(p(t+T)-p(t))/\|p(t+T)-p(t)\|$  方向进行周期拓展才能生成连贯的多周期运动.周期数为  $n$  的周期拓展可以描述为

$$\begin{aligned} Q'(t) &= Q(t) \cdot (n(q(t+T)-q(t)), (p(t+T)-p(t))/\|p(t+T)-p(t)\|) \\ &= (q(t)+n(q(t+T)-q(t)), p(t)+\arccos((p(t+T)-p(t))/\|p(t+T)-p(t)\|)). \end{aligned}$$

##### (3) 偏移映射

由于规划后路径的起点和方向不同于原始运动,需要采用偏移映射方法将原始运动重定向到新的运动轨迹上.已知原始运动为  $Q(t)$ ,经过偏移映射后的运动为  $Q'(t)$ ,从  $Q(t)$  到  $Q'(t)$  的偏移映射为  $(U(t),V(t))$ ,  $U(t)$  和

$V(t)$ 分别表示  $t$  时刻偏移的平移向量和旋转角度。 $T(t)$ 表示  $t$  时刻原始运动到坐标系原点的平移向量,  $F(V(t))$  表示对应  $V(t)$  的单位旋转矩阵.那么偏移映射可以表示为

$$\begin{aligned} Q'(t) &= Q(t) \oplus (U(t), V(t)) \\ &= (T(t)^{-1} F(V(t)) T(t)(q(t) + U(t)), q(t) + V(t)). \end{aligned}$$

根据运动规划的结果,可计算出  $(U(t), V(t))$ ,然后根据上式计算出目标运动序列.

## 4 多角色协同

当将多个单角色的运动融合到同一个虚拟场景时,角色间应该在思想行为上协同工作,同时避免可能存在的各类冲突.而且由于虚拟场景会对角色的运动施加各种时空约束,角色与场景之间也要进行协调.因此,多角色协同主要研究多角色间的协同和角色与虚拟场景的协同问题,需要解决的关键问题有运动冲突的避免、运动模式的决策、时空约束的指定等.

### 4.1 角色与虚拟环境的协同

目前的动画和游戏大都是在结构化虚拟场景下运行的,为了提高虚拟场景和角色运动的逼真性、多样性,应研究非结构化的虚拟环境下场景的多样性、路径的崎岖性以及运动路径规划的随机性等对角色运动的影响.

在角色与虚拟环境的协同中,首先确定虚拟环境对角色施加的时空约束条件,然后把时空约束条件作为输入,利用有限状态机(详见第 4.3 节讨论)进行推理,最后输出满足时空约束的运动模式.虚拟场景对角色施加的时空约束,一部分通过人机交互接口确定,另一部分由系统自动检测得到.

### 4.2 角色间的协同

#### 4.2.1 多角色间的行为协同

多个角色间的行为协同分为被动协同和主动协同.被动协同是指为了角色完成规定的某个任务而被动地协同工作,如动画师事先安排两个角色在指定地点握手等.这种协同通过人机交互接口由动画师指定时空约束条件.主动协同是指根据场景的需要,多个角色自主地进行协同工作.如某个角色在行进过程发现另一角色,而自主决定握手或打招呼.角色的行为模式对应了相应的时空约束.

从本质上说,角色与环境的协同可以看做是运动角色与静止角色的协同,因而我们也可以利用有限状态机来推理角色在一段路径上的运动策略,然后采用时空约束方法和数值优化方法求解该段路径上连续的运动姿势.

#### 4.2.2 多角色间的运动协同

除了上述多角色间的行为协同以外,多角色与虚拟场景的运动融合还需要解决运动协同的问题.例如,当两个角色在同一段路径上运动时,可能发生碰撞.在生成连续运动之前,需要检测多角色间碰撞时的运动冲突.

##### (1) 多角色间的碰撞

由于在真实的刚体运动中任意两个刚体不会相互贯穿,因而在运动过程模拟时必须进行碰撞检测.如果检测到碰撞,则需要改变角色的运动模式.

在机器人研究领域,众多的碰撞检测方法虽然理论可行,但都非常复杂而且不易使用.我们采用一种简单的碰撞检测方法:在同一个运动场景中,当两个角色间的欧氏距离小于某个阈值时,将一个运动角色上的各个顶点与另一运动或静止角色上的每一个由关节点组成的三角面片进行求交测试,若存在有效交点,则说明在该时刻两角色存在碰撞,否则不相碰.根据生理学常识,两个手臂平展时的最大距离与人体的高度近似,因此将阈值设定为人体高度的一半.

在检测到角色间存在运动碰撞后,可采用多种方法来解决碰撞问题:(1) 保持角色原来的运动速度,但改变其运动方向;(2) 保持角色原来的运动方向,但改变其相对速度;(3) 同时改变角色的运动方向和相对速度.

##### (2) 独占资源管理

协同控制中必须提供良好的策略来管理协同活动中某个时刻只能被一个角色所使用的独占资源.目前,比

较通用的方法是使用令牌环的方法.该方法能够保证独占性、公平性,但效率不高,而且对于抢占式的资源不实用.在协同虚拟环境中,由于不同的角色对独占资源享有不同的申请权限和操作权限,该方法无法很好地解决协同虚拟环境中独占资源的分配问题.在多角色运动融合中,我们对独占资源采用两层管理的策略:① 检测在虚拟环境中存在哪些独占资源,然后根据运动规划结果,预测哪些角色可能使用独占资源.② 根据检测的结果按照角色的运动优先权进行并发控制.

### 4.3 离散运动决策

在角色间的协同和角色与虚拟场景的协同中,每个角色的运动都受到周围场景的约束,因而采用的运动模式

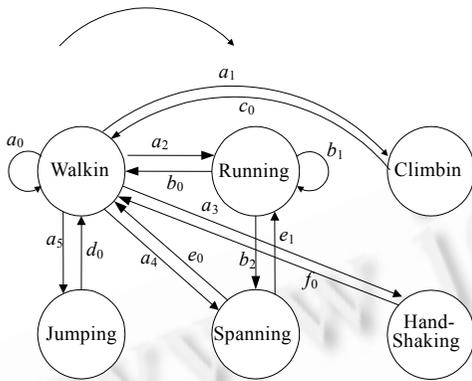


Fig.4 Definite state machine  
图4 运动模式有限状态机

式与原始捕获运动不一定完全相同.所以在求解连续运动之前,需要选择某段路径下合适的运动模式,是走、跑、爬、跨、跳还是绕行,是否需要用手支撑或身体接触等.我们引入有限状态机来解决离散运动的决策.但有限状态机的引入不仅是为了完成运动模式的选择,更重要的是它体现了一种主动协同的思想,使角色突破动画师指定的被动协同,而根据场景和其他角色的介入自主地感知、决策和运动.

运动模式有限状态机是一个3元组 $(Q, \Sigma, \delta)$ ,  $Q$ 是一个有穷状态集合,集合中的每个元素表示一种运动模式,  $\Sigma$ 是一个有穷输入集合,集合中的每个元素表示角色与虚拟场景或者角色间的时空约束条件,  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 是状态转移函数,表示在运动状态  $q_0 \in Q$  的情况下,当输入约束条件时,有限状态机输出确定的某  $q_1, q_1 \in Q$ .例如运动模式  $Q = \{\text{climbing, walking, running, jumping, spanning, handshaking}\}$  的有限状态机采用的离散运动决策策略如图4所示.

## 5 连续运动生成

连续运动生成的目的是生成满足约束条件且使某个目标函数最小的人体运动.首先规定时空约束条件和运动目标函数,然后通过复杂的非线性优化方法来求解精确的运动序列.

### 5.1 时空约束条件

时空约束条件是指虚拟环境或者人为地对角色的运动在时间和空间上进行的某些限制,它规定了角色应该和可以做什么,这样就能保证在保存运动的一些固有属性的前提下,使运动按照周围环境的变化进行变换,以保持运动的逼真性.

通常时空约束都用一组约束方程组来描述.这种约束可表达为

$$F(q(t), p_0(t), \dots, p_n(t)) = C.$$

其中  $t$  表示时空约束作用的时间,  $q(t)$  和  $p_i(t)$  表示运动参数,  $C$  为常量.

### 5.2 运动目标函数

运动目标函数规定如何完成特定的运动.由于目标函数是采用运动参数的向量来描述的,而各个运动参数对运动的影响又有所不同,因而我们采用各个参数的加权平方和来描述目标函数.在运动融合中,我们通常采用两个运动目标函数.

其一是使视频序列中理想关节位置与实际关节位置的偏差总和最小,数学表达式为

$$\text{Min} (sum = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \sum_{k=1}^{16} \|p_k(t) - \hat{p}_k(t)\|_2 dt),$$

式中的  $p_k(t)$  表示编辑后第  $k$  个关节的位置坐标,  $\hat{p}_k(t)$  表示第  $k$  个关节的理想位置坐标,  $t_{\text{start}}$  和  $t_{\text{end}}$  分别表示运动编辑区间的起始点.

其二是使运动编辑前后的运动差异最小,数学表达式为

$$\text{Min} (\text{sum} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \|Q(t) - Q'(t)\|_2 dt),$$

式中的  $Q(t)$  表示编辑后  $t$  时刻的运动姿势,  $Q'(t)$  表示  $t$  时刻的理想运动姿势。

### 5.3 运动姿势求解

求解时空约束条件下运动姿势的方法是前向运动学和逆向运动学。前向运动学直接确定角色各个关节点的位置和方向,而逆向运动学通过由用户指定角色上某些关节点需要达到的位置和方向,来计算出其他关节点的位置和运动方向,使角色达到目标位置。逆向运动学方法在一定程度上减轻了正向运动学方法的繁琐工作。虽然逆向运动学方法能求得所有解,但对复杂度高的关节分析求解的代价很大,因而我们结合逆向运动学方法和数值优化方法来克服这个问题。

## 6 实验结果

浙江大学-微软视觉感知联合实验室开发了一个基于双相机的视频动画系统 VBHA V2.0。该系统采用 Visual C++实现,运行在 Windows X 平台上。它实现了基于视觉的原始运动捕获、单角色的运动编辑和运动重定向、多角色的运动融合和动画显示等基本功能。

为了进行结构化环境下的人体运动捕获,我们根据人体骨架模型设计了一套紧身衣,在每个关节点处附上不同颜色的色块作为标记,运动捕获的目标为捕获色块中心点的三维运动序列。图 5 是对拍摄的一段视频利用视觉技术恢复的三维人体运动序列。图 5(a)是捕获的三维人体跳跃运动序列,图 5(b)是捕获的三维人体行走运动序列。

为了对多角色的运动融合方法进行说明,我们给出如图 6 所示的示意图。系统输入的运动捕获数据原始方向如图 6(a)所示,动画师规划的 4 个角色的运动轨迹(未启用自动路径规划)如图 6(b)所示。图 6(c)表示多角色的运动协同中检测到可能存在的 3 个运动冲突(用圆表示)和动画师规定角色完成的协同功能(用虚线圆表示)。经过运动协同和冲突检测处理后产生的离散运动模式和约束条件输入到运动求解层,系统求解出的连续运动的轨迹如图 6(d)所示。

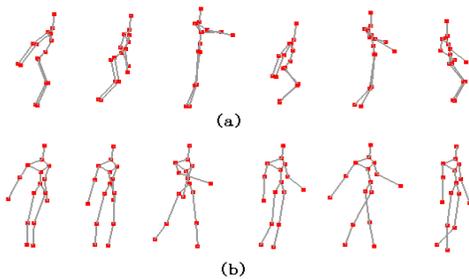


Fig.5 Captured motions  
图 5 捕获的三维运动

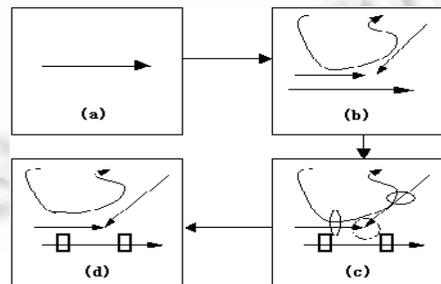


Fig.6 The process of motion fusion  
图 6 运动融合过程

为了测试多角色与虚拟场景运动融合的可行性和本文提出的算法的有效性,我们根据捕获的运动数据将多个角色融合到同一个场景中。图 7(a)将两个不同步幅、频率和方向的行走动作融合到同一个场景中。在动画师事先指定两角色在指定地点握手后,系统自动生成两个角色从起点到目的地的连续运动。图 7(b)是将 4 个角色的运动融合到同一个非结构化场景中的实验结果。场景中存在门和门槛两个障碍物。各角色的初始运动轨迹(如图 6(b)所示)和被动协同(如两角色握手)由动画师规定,而行进过程中各个角色的运动模式和连续运动生成由系统自动得到。在运动协调层,当系统检测到门后,根据角色和门的相对高度自主选择弯腰的运动模式。类似地,在系统检测到门槛时角色自主决定采用跨过门槛的运动模式。在运动求解层,根据运动协同产生的时空约束条件和运动模式,系统自动生成各角色相应的连续运动。从图中可以看出,系统自动生成了各个角色的离散运动模式和逼真的连续运动。

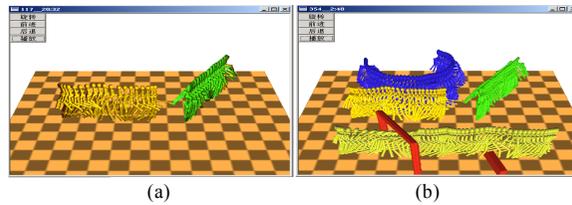


Fig.7 Multi-Character motion fusion with virtual scenes

图7 多角色与虚拟场景的运动融合结果

## 7 结论和展望

本文提出了多角色运动融合的新概念和相应的实现方法.它利用单一结构化环境下捕获的运动结果,将多个角色的运动有效地融合到一个虚拟的非结构化环境中,实现了角色与角色、角色与场景的协同.本文提出的采用有限状态机来决定离散运动模式的方法,提高了角色在虚拟场景中协同工作的感知、决策及运动能力,因而大大提高了多角色在复杂场景下协同的自动化程度.另外,利用本文介绍的运动变换方法可以将原始运动数据经过周期拓展、偏移映射重定向到新的路径上,因而提高了运动捕获数据的重用性.高自主性和高重用性使得本文提出的方法在计算机动画和计算机游戏中具有普遍的应用价值.

在本文提出的多角色运动融合方法中,还存在以下难点需要深入研究:(1) 在离散运动决策中,有限状态机中规则的多少决定了推理的正确性,因此对于复杂的运动场景,需要改进决策能力.(2) 在运动融合中,复杂的虚拟环境对角色的约束随着多个角色的介入增加了运动姿势求解的运算量.进一步的工作希望能通过提高算法的效率,降低复杂度.(3) 本文主要讨论的是三维运动的融合,将从视频流中提取的二维运动直接进行融合还需要深入研究.

**致谢** 吴飞博士、刘丰硕士和陈怡声等同志对本文的完成提出了很多有益的建议,在此一并表示感谢.

## References:

- [1] Ko H, Badler NI. Straight line walking animation based on kinematic generalization that preserves the original characteristics. In: Proceedings of the Graphics Interface'93. Toronto, Ontario, CA: ACM Press, 1993. 9~16.
- [2] Unuma M, Anjyo K, Takeuchi R. Fourier principles for emotion-based human figure animation. In: Proceedings of the SIGGRAPH'95. Los Angeles, CA: ACM Press, 1995. 91~96.
- [3] Wiley DJ, Hahn JK. Interpolation synthesis for articulated figure motion. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium'97. New Mexico: IEEE Computer Society Press, 1997. 157~160.
- [4] Within A, Popovic Z. Motion warping. In: Proceedings of the SIGGRAPH'95. Los Angeles, CA: ACM Press, 1995. 105~108.
- [5] Bruderlin A, Williams L. Motion signal processing. In: Proceedings of the SIGGRAPH'95. Los Angeles, CA: ACM Press, 1995. 97~104.
- [6] Cohen MF. Interactive spacetime control of animation. In: Proceedings of the SIGGRAPH'92. Chicago: ACM Press, 1992. 209~302.
- [7] Liu Z, Gortler SG, Cohen MF. Hierarchical spacetime control. In: Proceedings of the SIGGRAPH'94. Orlando: ACM Press, 1994. 35~42.
- [8] Popovic Z, Witkin A. Physically based motion transformation. In: Proceedings of the SIGGRAPH'99. Los Angeles: ACM Press, 1999. 11~20.
- [9] Rose C, Guenter B, Bodenheimer B, Cohen MF. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. In: Proceedings of the SIGGRAPH'96. New Orleans: ACM Press, 1996. 147~154.
- [10] Lee J, Shin SY. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In: Proceedings of the SIGGRAPH'99. Los Angeles: ACM Press, 1999. 39~48.
- [11] Luo ZX. Video motion extraction and motion synthesis [Ph.D. Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese with English Abstract).
- [12] Kalisiak M, van de Panne M. A grasp-based motion planning algorithm for character animation. Journal of Visualization and Computer Animation, 2001,12(3):117~129.

## 附中文参考文献:

- [11] 罗忠祥. 视频流中的人体运动提取与运动合成[博士学位论文]. 杭州:浙江大学,2002.