

基于人体运动规律的运动融合技术

孟巍¹, 郭卫斌¹, 朱昌明¹, 徐骏剑¹, 杜宇¹, 黄妍芳²

(1. 华东理工大学 计算机科学与工程系, 上海 200237; 2. 华东理工大学 艺术设计系, 上海 200237)

(mengwei93@gmail.com)

摘要:介绍一种不需要人工干预的运动融合方法,提出基于关节运动规律的运动周期判别方法。通过分析运动捕获数据,计算双膝与臀部节点连线夹角的变化确定运动周期,然后再进行时空变形、插值与约束重建,从而生成高质量的运动融合动画。实验结果表明,该算法能够准确计算出运动周期,并且使约束后的融合动作更加真实。

关键词:计算机动画;运动捕获;运动融合;运动插值;时空约束

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Motion fusion technique based on characteristics of human motion

MENG Wei¹, GUO Wei-bin¹, ZHU Chang-ming¹, XU Jun-jian¹, DU Yu¹, HUANG Yan-fang²

(1. Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Department of Art Design, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: This paper proposed a motion fusion method without manual intervention, and suggested a way to identify the motion cycle based on joint movement. The cycle was calculated through the analysis of the motion capture data and the angle between the knees and the hips node. Then high-quality motion blending animation came into being after the procedures of time and space warping, interpolation, and constraints reconstruction. The experimental result shows that the proposed algorithm can calculate the motion cycle accurately and make the fusion motion under constraints more realistic.

Key words: computer animation; motion capture; motion fusion; motion interpolation; space-time constraint

0 引言

计算机动画开始于20世纪60年代,经过短短几十年,计算机动画已经发展成为一种重要的媒体制作手段,广泛应用于游戏、广告、医学、教育和军事等领域。由于缺乏高效的动画制作工具,传统的动画制作在相当程度上还是一个标准的劳动密集型行业,制作成本高,软件开发重用率低。近年来运动捕获技术飞速发展,已经成为计算机动画中最有发展前景的方向。运动捕获技术就是利用特定的设备,捕获人体特定关节的运动从而得到非常真实细致的运动数据^[1]。利用运动捕获技术生成的动画比较逼真,但是这种方法存在着较大的局限性,捕获的数据只能在特定的环境下应用,对场景改变或者用户需求的改变适应能力较弱。运动编辑技术提供了对捕获数据进行再编辑的能力^[2]。本文研究运动编辑中的运动融合技术,能够大大提高捕获数据的可重用性。

1 相关工作

运动融合,也称运动混合,是将两个或者多个指定的捕获运动进行参数混合,从而得到新的运动或运动过渡。在运动融合中,为了对不同运动速率或者不同运动周期的运动进行编辑,需要进行时间变形处理,从而产生相同的时间分布。Asharaf等人^[3]通过对原始运动的关节参数进行加权平均,实现运动融合。Unuma等人^[4]通过在频率域上对运动参数进

行加权平均,生成融合运动。Rose等人^[5]采用时空约束和IK约束相结合的方法,生成了无缝的、物理上可行的运动过渡。Park等人^[6]提出了基于散乱插值的实时方法。Kovar等人^[7]提出利用配准曲线进行运动混合,扩充了参数融合的运动类型。洪炳熔等人^[8]也使用层次B样条技术进行虚拟人步行和跑步之间的运动过渡。本文提出了一种基于关节运动规律的周期判定方法,通过分析双膝和臀部节点的变化规律来确定运动周期,然后采用基于时空变形的方法进行运动融合。

2 运动编辑

2.1 人体结构表示

本文采用层次性的人体模型,人体运动由骨架运动来表示。关节点的结构是树形结构,将关节看成节点,将关节之间的骨骼看成是链,就可以按照运动关系将各关节链接起来。在骨骼的运动过程中,骨骼各个节点的局部坐标系均会发生变化,但是骨骼的长度及其在局部坐标系中的位置是不变的。骨骼的运动过程实际是骨骼各个节点局部坐标系按照时序发生变化的过程。其中Root节点也就是根节点为局部坐标系变化的核心,其他骨骼节点直接或间接受到根节点局部坐标系影响。在人体的三维重建结果已知的前提下,我们先计算根节点的平移和旋转向量,然后逐个计算每个关节点的旋转向量,这样就可以求出运动序列中每一帧人体模型中各个关节点的旋转向量。根据此法求出根节点的平移向量和各关

收稿日期:2010-07-10;修回日期:2010-09-06。

基金项目:浙江大学CAD&CG国家重点实验室资助项目(A0910);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(WH0914010)。

作者简介:孟巍(1984-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向:运动融合、运动重定向;郭卫斌(1968-),男,陕西西安人,副教授,博士,主要研究方向:计算机仿真、高性能计算;朱昌明(1988-),男,上海人,主要研究方向:运动融合、运动路径编辑;徐骏剑(1989-),男,上海人,主要研究方向:运动融合;杜宇(1989-),男,安徽芜湖人,主要研究方向:运动路径编辑;黄妍芳(1988-),女,江西赣州人,主要研究方向:人体建模。

节的旋转向量,人体运动可以描述为^[9]:

$$\mathbf{M}(f) = (\mathbf{P}_R(f), \mathbf{q}_1(f), \dots, \mathbf{q}_n(f)) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{P}_R(f)$ 为第 f 帧中根节点的在世界坐标中的平移向量, $\mathbf{q}_i(f)$ 表示第 f 帧中第 i 个关节的旋转向量。

2.2 正向运动学和逆向运动学

给定人体各关节的运动参数,根据这些运动参数计算出人体运动给定位置和方向,这种方法一般称为正向运动学。逆向运动学给定末端效应器的位置和方向,反向求出其他各关节的参数。在逆向运动学中一般把最末端的关节称为末端效应器^[10]。设向量 $\mathbf{e} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ 表示所有关节的自由度, m 表示状态向量的维度,则末端效应器的位置可由正向运动学求出: $\mathbf{p} = \mathbf{f}(\mathbf{e})$ 。逆向运动学的方程可以表示为 $\mathbf{e} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{p})$,已知末端效应器的位置 \mathbf{p} ,逆向求出所有关节的自由度 \mathbf{e} 。

2.3 时空约束

时空约束的目的是在保存运动一些固有属性的前提下控制运动的变化以保持运动的逼真性^[11]。通常时空约束用约束方程组来描述,表示为: $\mathbf{F}(t_c, \mathbf{m}) = \mathbf{c}$ 。其中: t_c 表示约束作用的时间; \mathbf{m} 表示运动参数,可以采用位置坐标来表示,也可以用旋转向量和平移向量来表示; \mathbf{c} 为标量矩阵, $\mathbf{F}(t_c, \mathbf{m})$ 表示 t_c 帧对应的运动。在动画制作中,场景和动画师对角色施加的时空约束主要包括以下两种:

1) 对角色施加姿势约束:

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}(t) \\ \mathbf{R}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_0 \\ \mathbf{C}_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{M}(t)$ 是用旋转向量和平移向量表示的运动参数, $\mathbf{T}(t)$ 表示 t 时刻Root点的位置向量, \mathbf{C}_0 表示平移常量, $\mathbf{R}_i(t)$ 表示 t 时刻关节 i 的旋转向量, \mathbf{C}_1 表示旋转常量。

2) 对角色支撑点施加位置约束:

$$\mathbf{P}_i(t) = \mathbf{C}_2 \quad (3)$$

其中: $\mathbf{P}_i(t)$ 表示第 i 个关节在 t 时刻的位置向量, \mathbf{C}_2 表示位置常量。

3 运动融合

运动融合包含两种常见的形式:运动插值和运动过渡。本文主要针对运动融合中的运动插值算法展开研究。运动插值主要对两个运动进行合成处理,生成新的类型的运动。目前的运动插值算法存在一定的局限性,要求输入的运动在逻辑上一致,也就是具有相似的周期性和动作对应关系。如跑步和走路就能够进行有意义的运动插值,生成“慢跑”的动作;可如果是射箭和跳芭蕾这两个动作,虽然可以进行插值,但是生成的杂乱无章的动作,结果没有任何意义,所以本文只研究插值后的动作有实际意义的情况。

3.1 运动时间变形

时间变形是运动插值的第一步。时间变形的目的是使两个运动之间的关键帧产生一一对应的关系,并且持续相同的时间。Rose等人^[12]和Park等人^[6]通过人工挑选关键帧,把多个运动的时间对齐到一起,构造如下函数:

$$t(T) = \left((m-1) + \frac{T - K_m}{K_{m+1} - K_m} \right) \frac{1}{N_k - 1} \quad (4)$$

其中 m 为最大的指数,即 $T > K_m$ 。

图1更直观地表示了多个输入运动经过时间变形前后的关系。

Rose和Park的方法需要人工的干预,手动挑选出关键帧,影响了时间变形的效率,而且主观因素较大。本文利用人

体运动的周期性,自动匹配输入运动的时间。

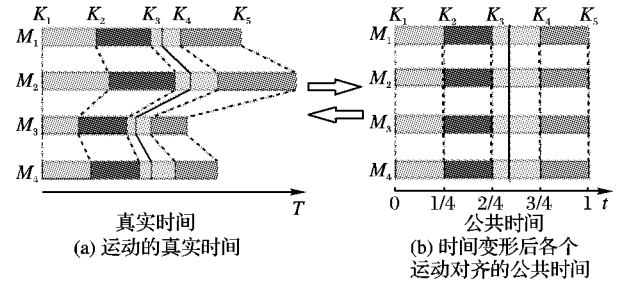


图1 时间变形过程前后示意图

传统的利用运动特征判别运动周期的方法利用脚部的末端效应器落地的空间位置和持续的时间,来判断双脚落地的时间、落地时有无重叠,并综合得出运动周期。这种确定运动周期的方法由于波形具有一定的周期性,可以计算出运动周期,但运动产生扰动较大,需要做低通滤波处理,操作较为繁琐,且不容易确定脚部落下和离开地面的时间。

本文采用利用人体关节运动周期性的方法来判断运动周期。人体上下肢运动的幅度比较大,且呈现出周期性,所以考虑双膝和臀部关节在空间中所成夹角 θ 的变化,如图2。走路或者跑步等运动,双膝和臀部关节的夹角呈现周期性变化,当双腿张开的角度最大时,为一个周期的开始标志。

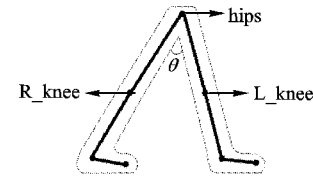


图2 夹角示意图

时间变形的算法步骤如下。

1) 运用正向运动学计算出两个膝关节的坐标 \mathbf{P}_{L_knee} 和 \mathbf{P}_{R_knee} ,然后求出双膝和臀部所成夹角的函数^[13]:

$$\theta(t) = \arccos \left(\frac{(\mathbf{P}_{L_knee} - \mathbf{P}_{L_hip}) \cdot (\mathbf{P}_{R_knee} - \mathbf{P}_{R_hip})}{(\mathbf{P}_{L_knee} - \mathbf{P}_{L_hip}) \cdot (\mathbf{P}_{R_knee} - \mathbf{P}_{R_hip})} \right) \quad (5)$$

2) θ 对时间 t 求导,令 $\frac{d\theta}{dt} = 0$,计算出 θ 变化的极值点,提取出极值点所在的帧的集合 $C(t)$,划分出运动周期。

3) 确定运动周期之后,按照线性对齐的方法对齐两个运动之间的帧:

$$\frac{f'_i - f'_1}{f_i - f_1} = \frac{f'_2 - f'_1}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

其中: f_1 和 f_2 是输入运动 m_1 在一个运动周期上的起始帧和结束帧, f'_1 和 f'_2 分别是输入运动 m_2 对应运动周期上的起始帧和结束帧。两个运动在这个运动周期的帧的对应关系可由式(7)确定:

$$f'_i = f'_1 + \frac{f'_2 - f'_1}{f_2 - f_1} (f_i - f_1) \quad (7)$$

3.2 空间变形

输入运动经过时间变形后,各输入运动在同一运动周期中的帧产生了对应关系。由于人物空间位置的不同,运动插值后容易出错,所以需要输入运动进行空间变形。空间变形就是把输入运动经过平移、旋转等变换,使各输入运动的空间位置和朝向尽可能相似。

根据正向运动学计算出人体模型各个关节点位置,并将关节表示成空间上的点云,不同的帧对应不同的点云;然后计

算不同点云之间的函数,经过运动变换后,使点云距离达到最小,实现人体运动空间变形的目的。

本文对两个输入运动 m_1 和 m_2 的任意对应帧进行空间变形。设 m_1 中的第 i 帧 f_i 中一个关节坐标为 $(x, y, z)^T$, 设 m_2 中第 i 帧 f_i' 中的相同关节坐标为 $(x', y', z')^T$ 。考虑简单的人体运动,通常只在 XOZ 平面上绕 Y 轴的旋转,设旋转角度为 θ 。

任意两帧之间的距离函数为^[7]:

$$D(F_i, F_j) = \min_{\theta, x_0, z_0} \sum_k \omega_k \|P_{i,k} - T_{\theta, x_0, z_0} P_{j,k}\|^2 \quad (7)$$

其中: $P_{i,k}$ 是由第 i 帧生成的邻居点云上的第 k 个节点; $T_{\theta, x_0, z_0} P_{j,k}$ 是把第 j 帧和第 i 帧对齐的仿射变换矩阵; ω_k 是权值,决定了每个节点对最终距离值的影响程度。展开后对 θ, x_0, z_0 求偏导,分别令 $\frac{\partial D}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial D}{\partial x_0} = 0, \frac{\partial D}{\partial z_0} = 0$, 可得:

$$\theta = \arctan \frac{\sum_k \omega_k (xz' - zx') - (\bar{x}z' - \bar{x}'z)}{\sum_k \omega_k (xx' + zz') - (\bar{x}x' + \bar{z}z')} \quad (8)$$

$$x_0 = \bar{z} + \bar{x}' \sin \theta - \bar{z}' \cos \theta \quad (9)$$

$$z_0 = \bar{z} + \bar{x}' \sin \theta - \bar{z}' \cos \theta \quad (10)$$

3.3 根节点插值

利用加权平均的方法直接求得运动插值后的根节点坐标:

$$P_R(t) = \sum_k \omega_k(t) P_k(t) \quad (11)$$

其中, $P_k(t)$ 是经过时空变形后的第 k 个运动在 t 时刻的根节点坐标, ω_k 表示该运动对应的权值, $P_R(t)$ 是运动融合后的根节点坐标。

3.4 关节插值

利用四元数球面线性插值函数,对其他节点的旋转向量进行插值处理:

$$A_R(t) = \text{Slerp}(A_1(t), A_2(t), \omega(t)) \quad (12)$$

其中, $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 分别为两个输入运动帧中的对应关节旋转向量, $\omega(t)$ 是旋转向量对应的权值, $A_R(t)$ 是经过四元数球面线性插值后的关节旋转向量。

3.5 约束重建

输入运动经过运动融合以后,由于采用线性插值算法可能导致融合运动的失真,因此,需要对融合后的运动建立约束。本文主要考虑足部末端效应器的时空约束^[14]。足部末端效应器一般包括速度和位置两个方面,落地约束是足部的垂直速度接近零,位置的垂直距离接近零。由于两个输入运动 m_1 和 m_2 的约束是不同的,进行约束探测后,提取其中一个运动 m_1 的约束作为主约束,判定公式为:

$$\begin{cases} |\vec{v} \cdot \vec{n}| \leq \lambda_1 \\ |\vec{d} \cdot \vec{n} - \vec{h}| \leq \lambda_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中: \vec{v} 是足部末端效应器的速度向量, \vec{d} 是足部末端效应器与地面的距离向量, \vec{n} 是方向垂直向上的单位向量, \vec{h} 是从运动 m_1 提取出的足部距离地面的垂直向量, λ_1 和 λ_2 是两个略大于0的阈值。

约束建立之后,利用逆向运动学来对融合后的运动进行重建^[15],从而求出融合后的运动。

4 实验结果

根据研究内容,本文把一段人体沿斜面走路的运动(见图3)和一段人体跑步的运动(见图4)作为输入运动。



图3 沿斜面走路

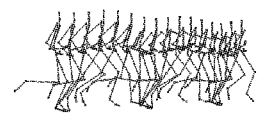


图4 跑步

图5是跑步运动中一只脚距离地面的高度,在0.7~0.8s和1.9~2s时,有与周期性无关的极值点出现,对运动周期的判断造成影响。

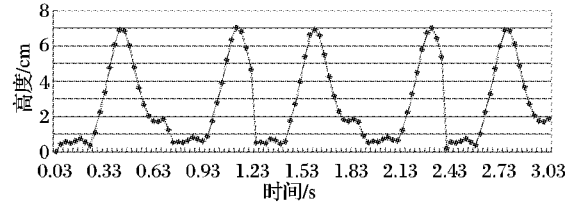


图5 跑步时足部距离地面的高度

实验采用基于关节运动规律的方法判别运动周期,如图6。分析出的结果周期清楚,单调性非常好,为下一步时间变形提供了基础。按权值比例1:1把这两段输入运动进行运动融合,得到融合后的运动“慢跑”。

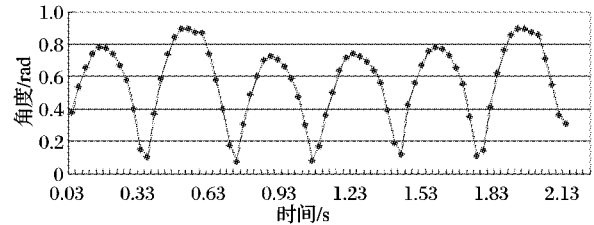
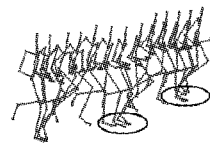


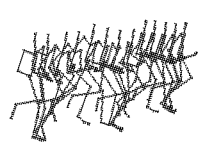
图6 双膝和臀部所成夹角

融合后的运动如果不添加时空约束,运动明显失真,有“滑步”现象出现,如图7(a)中圈出的区域。

融合后施加约束的沿斜面慢跑运动周期清晰,插值效果好,见图7(b),并且经过约束重建之后,人体运动没有滑步的情况发生。实验结果证明文中提出的利用人体运动周期进行融合的方法是可行且有效的。



(a) 没有约束的融合运动



(b) 施加时空约束的融合运动

图7 没有约束及施加约束的融合运动

5 结语

本文针对运动融合中的参数插值提出一种新的判别运动周期的方法,主要利用了人体肢体运动的周期性。通过判别双膝和臀部节点所成夹角的运动规律,进而判断出人体运动的周期。融合后的运动加入了改进的时空约束,有效避免了滑步情况的发生,使生成运动更加真实。

参考文献:

- [1] 罗忠祥, 庄越挺, 刘丰, 等. 基于视频的人体动画[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(2): 269-276.
- [2] GLEICHER M. Animation from observation: Motion capture and motion editing[J]. Computer Graphics, 1999, 33(4): 51-54.
- [3] ASHRAF G, WONG K. Generating consistent motion transition via decoupled framespace interpolation[J]. Computer Graphics Forum, 2000, 19(3): 447-456.

- flames[C]// Proceedings of SIGGRAPH 02, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series. New York: ACM, 2002: 729-735.
- [6] HONG J M, SHINAR T, FEDKIW R. Wrinkled flames and cellular patterns[C]// 2007 Computing Machinery's Special Interest Group on Computer Graphics. New York: ACM, 2007: 1-6.
- [7] HORVATH C, GEIGER W. Directable, high-resolution simulation of fire on the GPU[C]// 2009 Computing Machinery's Special Interest Group on Computer Graphics. New York: ACM, 2009: 1-8.
- [8] PERRY C H, PICARD R W. Synthesizing flames and their spreading[C]// Proceedings of the 5th Eurographics Workshop on Animation and Simulation. Oslo, Norway: [s. n.], 1994: 1-14.
- [9] BEAUDIN P, PARQUET S, POULIN P. Realistic and controllable fire simulation[C]// Proceedings of Graphics Interface. New York: ACM, 2001: 159-166.
- [10] LEE H, MEYER M, DESBRUN M, *et al.* Meshes on fire [C]// Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation. Berlin: Springer, 2001: 75-84.
- [11] ZHAO YE, WEI XIAOMING, FAN ZHE, *et al.* Voxels on fire [C]// Proceedings of the 14th IEEE Visualization. New York: IEEE, 2003: 36.
- [12] LOSASSO F, IRVING G, GUENDELMAN E, *et al.* Melting and burning solids into liquids and gases[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(3): 343-352.
- [13] LIU SHIGUANG, LIU QIGUANG, AN TAI, *et al.* Physically based simulation of thin-shell objects' burning [J]. The Visual Computer, 2009, 25(5/7): 687-696.
- [14] BRIDSON R, HOURIHAM J, NORDENSTAM M. Curl-noise for procedural fluid flow[C]// ACM SIGGRAPH 2007. New York: ACM, 2007: 46.
- [15] KIM T, THUREY N, JAMES D, *et al.* Wavelet turbulence for fluid simulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-6.
- [16] SCHECHTER H, BRIDSON R. Evolving sub-grid turbulence for smoke animation[C]// Proceedings of the 2008 ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York: ACM, 2008: 1-7.
- [17] NARAIN R, SEWALL J, CARLSON M, *et al.* Fast animation of turbulence using energy transport and procedural synthesis[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-8.
- [18] PFAFF T, THUREY N, SELLE A, *et al.* Synthetic turbulence using artificial boundary layers[C]// ACM SIGGRAPH Asia 2009. New York: ACM, 2009: 1-10.
- [19] BESL P J, McKAY N D. A method for registration of 3-d shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 39-256.
- [20] JONES M W. The production of volume data from triangular meshes using voxelisation[J]. Computer Graphics Forum, 1996, 15: 311-318.
- [21] MACDONALD C B., RUUTH S J. Level set equations on surfaces via the closest-point method [J]. Journal of Scientific Computing, 2008, 35(23): 219-240.
- [22] CHEN XIAO-DIAO, YONG JUN-HAI, WANG GUO-ZHAO, *et al.* Computing the minimum distance between a point and a NURBS curve[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(10/11): 1051-1054.
- [23] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. Journal of Computer Physics, 1988, 79(1): 12-49.
- [24] BREEN D E, WHITAKER R T. A level-set approach for the metamorphosis of solid models[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(2): 173-192.
- [25] MALLETT V, KEYES D E, FENDELL F E. Modeling wildland fire propagation with level set methods[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007, 57(7): 1089-1101.
- [26] HONG YI, ZHU DENGMIN, QIU XIANJIE, *et al.* Geometry-based control of fire simulation[J]. The Visual Computer, 2009, 26(9): 1217-1228.
- [27] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. Fluid mechanics[M]. New York: The World Publishing Corporation, 1999.
- [28] FEDKIW R, STAM J, JENSEN H W. Visual simulation of smoke [C]// Proceedings of SIGGRAPH. New York: ACM, 2001: 15-22.
- [29] NGUYEN D Q, FEDKIW R P, KANG M. A boundary condition capturing method for incompressible flame discontinuities[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 172(1): 71-98.
- [30] FRISCH U. Turbulence: The legacy of A. N. Kolmogorov [M]. New York: Cambridge University Press, 1995.

(上接第44页)

- [4] UNUMA M, ANJYO K, TAKEUCHI R. Fourier principles for emotion-based human figure animation[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York: ACM, 1995: 91-96.
- [5] ROSE C, GUENTER B, BODENHEIMER B, *et al.* Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 147-154.
- [6] PARK S, SHIN H J, KIM T H, *et al.* On-line motion blending for real-time locomotion generation [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(3): 125-138.
- [7] KOVAR L, GLEICHER M, PIGHIN F. Motion graphs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(2): 473-482.
- [8] 洪炳熔, 贺怀清. 虚拟人的步行和跑步运动控制方法的研究[J]. 高技术通讯, 2001, 11(3): 91-95.
- [9] KOVAR L, GLEICHER M. Flexible automatic motion blending with registration curve [C]// Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, New York: ACM, 2003: 214-224.
- [10] BOULIC R, THALMANN D. Combined direct and inverse kinematic control for articulated figure motion editing [J]. Computer Graphics Forum, 1992, 11(4): 189-202.
- [11] GLEICHER M, LITWINOWICZ P. Constraint-based motion adaption[J]. Journal of Visualization and Computer Animation, 1998, 9(2): 65-94.
- [12] ROSE C, BODENHEIMER B, COHEN M. Verbs and Adverbs: Multidimensional motion interpolation [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1998, 18(5): 32-40.
- [13] 潘红, 肖俊, 吴飞. 基于关键帧的三维人体运动检索[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(2): 213-212.
- [14] GLEICHER M. Retargeting motion to new characters [C]// Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1998: 33-42.
- [15] GROCHOW K, MARTIN S L, HERTZMANN A. Style-based inverse kinematics[C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2004: 522-531.