

基于小波变换的运动分析及其应用

刘 丰 庄越挺 潘云鹤 罗忠祥

(浙江大学计算机科学与工程系, 浙大 微软视觉感知联合实验室, 杭州 310027)

摘 要 对捕获的运动数据进行编辑处理, 是生成新的复杂人体动画和提高运动捕获数据重用性的关键, 但目前大多数运动编辑技术不具备对运动进行高层控制处理的能力, 为此, 提出了一种基于小波变换的运动编辑新算法。即将小波变换引入运动编辑, 并对运动信号进行多分辨率分析, 从而实现了运动特征增强、运动融合及运动特征提取与综合。实验结果表明, 该算法非常适合对运动特征进行处理, 由于其能够在高层次上对运动进行有效的编辑, 因而提高了动画师的工作效率。

关键词 运动编辑 小波变换 运动特征增强 运动融合 运动特征提取与综合

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)01-0068-09

Motion Analysis and Application Based on Wavelet Transformation

LIU Feng, ZHUANG Yue-ting, PAN Yun-he, LUO Zhong-xiang

(Department of Computer Science and Engineering, Zhejiang University,

Microsoft Visual Perception Laboratory of Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Motion editing is the key technology to improve the re-use of motion captured data and produce complex human animation. However, few techniques are capable of editing motion at high level. In this paper, wavelet transformation is introduced into motion multi-resolution analysis and some new algorithms, namely motion feature enhancement, motion fusion and motion feature extraction and synthesis, are proposed. Motion signal is decomposed into multi-resolution levels with wavelet analysis. The coarse level represents the overall pattern of a motion signal while the fine levels describe the details. Special motion style can be highlighted through enhancing the corresponding level content. And multiple motions can be fused by multi-resolution blending to create new motions somehow like to the blended motions. Special motion style can be synthesized into other motions by texturing them with related fine levels extracted from the related motions. The experiment shows that these algorithms are well suited for motion feature editing and enable animators to edit motion effectively at high level.

Keywords Motion editing, Wavelet transformation, Motion enhancement, Motion fusion, Motion feature extraction and synthesis

0 前 言

近年来, 运动捕获技术在计算机动画领域得到了广泛的应用。这种技术首先测量出运动对象各个关节在物理空间中的位置和方向; 然后把这些运动信息, 并以计算机可用的形式记录下来, 以构成运动信息库; 最后动画师从中选取运动信息, 并通过赋给动画角色来生成所需要的动画, 以便提高动画制作的效率, 使动画师能方便地制作各种生动逼真的

动画。但是由于捕获的运动类型单一、姿势简单, 因此需要对运动数据进行编辑, 其主要任务包括^[1]:

- (1) 再生新的复杂运动;
- (2) 制作一些超乎实际的运动;
- (3) 适应动画师意图的改变;
- (4) 提高运动捕获数据的重用性。

最初对运动数据的处理, 主要是由动画师对运动数据进行逐帧调整, 但这种方法效率低; 后来虽又提出了控制点调整和曲线拟合等方法, 但这些方法不适于对变化大的运动进行编辑。

基金项目: 国家自然科学基金(69803009); 教育部优秀年轻教师基金及高等学校骨干教师资助计划项目

收稿日期: 2001-12-26; 改回日期: 2002-06-10

近年来,又提出了一些基于约束的运动编辑技术,例如,Gleicher 提出了一种基于时空约束的运动控制技术^[2-4],该技术先由用户交互指定对运动施加的一些时空约束,然后通过建立并求解满足约束条件的目标方程来获得既能满足新的用户需求,又能保持原运动特征的新运动,但这种约束优化问题求解困难.文献[5]对这种方法进行了改进,提出了一种层次化交互编辑算法,该方法是先把约束优化问题分解成两个易于处理的子问题,再利用逆向运动学算法来调整被约束帧的运动姿势;然后通过多层 B 样条曲线适应技术来把运动的变化平滑地传播到其他帧. Brotman and Netravali 则采用优化控制技术来产生用户规定的运动^[6]. Cohen 开发了一个运动控制系统,它允许用户利用交互的方式来指导数值优化过程,以找到一个可行解^[7].但上述算法均忽略了运动的真实感问题,为此,Popovic 和 Witkin 提出了基于身体的运动编辑算法^[8],该算法除了用户指定的约束外,它还把运动所应具有的一些身体属性作为约束,同时为了提高求解效率,还首先对做了简化处理的运动模型进行处理,然后再处理完整的模型.

上述研究主要提供了一些在底层对运动进行编辑的工具,且还需要大量复杂的用户交互,效率较低.为此,Bruderlin 提出了运动信号处理算法^[9],其中包括多分辨率运动过滤、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方法.这些信号处理方法非常适合于重用和调整已有的运动数据;Unuma 等人则在频域采用傅立叶分析技术来对运动数据进行插值和外推^[10];Rose 等人采用多分辨率插值技术将多个运动混合起来生成新的运动^[11];Witkin 和 Popovic 则提出了运动变形技术^[12],该技术只要指定几个关键帧的运动特征,就能通过对原运动参数的调整来衍生出一系列的运动;Brand 和 Hertzmann 提出了运动样式机^[13],它通过学习已存在的运动数据库来生成具有指定特征的新运动.

1 人体模型与运动描述

本研究中采用的人体模型如图 1 所示,共有 16 个关节点,而通过运动捕获系统得到的是人体 16 个关节点的空间位置序列,如果直接用这些空间数据去描述运动信号,那么将给后续运动数据的使用带来极大的不便,因为在这种直观的运动描述中,各个关节点的运动是独立的,为了协调整个人体的运动,

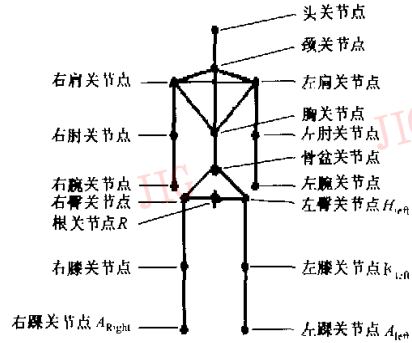


图 1 人体模型

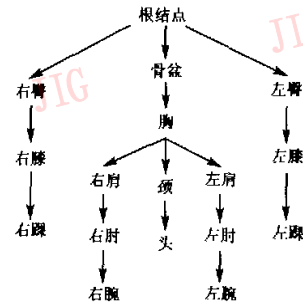


图 2 人体模型树

必须附加大量的约束,所以本文采用层次化的运动描述方式,即把人体模型看成是一棵树(如图 2 所示),其树的根结点对应人体模型中的根关节点,其他结点对应人体模型中的各个关节点.大家知道,整个人体运动由平移向量和旋转向量组成,即由根结点的平动,以及人体模型树上的各结点绕父结点的旋转组成.其中,根结点的旋转决定人体模型的方向,其他各结点的旋转是在以父结点为坐标原点的相对坐标系下进行的,且各个关节点的位置可以根据骨架长度和旋转向量求出,如图中的右踝关节点 A_{Right} ,其位置与旋转向量的对应关系为

$$P_{A_{Right}}^W(x, y, z) = T_R R_R T_{H_{Right}} T_{K_{Right}} R_{K_{Right}} T_{A_{Right}} R_{A_{Right}} P_{A_{Right}}^L(x, y, z) \quad (1)$$

其中, $P_{A_{Right}}^W(x, y, z)$ 表示右踝关节点 A_{Right} 的世界坐标, $P_{A_{Right}}^L(x, y, z)$ 表示初始时右踝关节点 A_{Right} 在以右膝关节点 K_{Right} 为原点的局部坐标系下的坐标; T_l 表示关节点 l 从当前坐标系平移到父关节点坐标系下的平移向量; R_l 表示关节点 l 绕父关节点的旋转向量,旋转向量由绕 x, y, z 轴的 3 个旋转分量组成,其中两个分量决定关节点的位置,另外一个为扭矩分量,用于决定该段骨架的方向.如果已知三维恢

复结果,那么就可以根据式(1)求出视频序列中与每一帧人体模型各个关节点对应的旋转向量.

根据式(1)求得的旋转向量,就可将视频序列中人体运动描述为

$$M(t) = (T_n^w(t), R_1(t), \dots, R_l(t), \dots, R_n(t)) \quad l=1, 2, \dots, n$$

其中, $T_n^w(t)$ 表示根关节点的世界坐标, $R_l(t)$ 表示 t 时刻第 l 个关节点的旋转角度向量.

2 运动信号的小波表示

由于小波的多分辨率分析具有良好的时域和频域局部化特征,且对高频采用逐渐精细的时域步长,可以聚焦到分析对象的任意细节,因此若将小波引入运动编辑,就能有效地对运动的细节特征进行控制.由于小波分解的低频部分反映了运动的基本特征,因此用其又能有效地对运动的基本特征进行编辑.

假设运动信号 $f(t) (f \in L^2(\mathbf{R}))$ 的离散值 C^n 为:

$$C^n = \{C_j^n\} \quad j, n \in \mathbf{Z} \quad 0 \leq j < n \\ 2^m \leq n < 2^{m+1}$$

其中, n 表示输入运动的帧数, m 表示运动信号将被分解的频带数. 根据多分辨率的定义可得

$$V_n = V_m \oplus W_m \oplus W_{m-1} \oplus \dots \oplus W_1 \quad (2)$$

若将 $f(t)$ 按式(2)展开,则根据小波变换理论可得

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^m d_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{m,k} \phi_{m,k}(t) \quad (3)$$

$$d_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (4)$$

$$c_{m,k} = \langle f(t), \phi_{m,k}(t) \rangle \quad (5)$$

其中, $\phi(x)$ 和 $\psi(x)$ 为相应的尺度函数和小波函数. 这样对于输入的运动信号,就可用式(4)和式(5)进行小波分解,而用式(3)来重建运动信号.

3 基于小波变换的运动分析及应用

3.1 运动特征增强

通过在频域上对运动进行分析可知,运动信号中的不同频带分量,反映了在不同层次上的运动特征,即运动信号的低频部分反映了运动的基本特征,而高频部分则反映了运动的细节.通过对相关频带信号进行处理,可以突出或削弱相应的运动特征,从而得到新的运动.例如,通过高频增强法来对分解的运动进行线性运算处理,这样通过增强代表某些运动细节的高频成分,就可以相对突出该细节;而对低频进行变换,则可以改变运动的一些基本属性,以控制运动趋势.下面介绍运动特征增强算法的具体实现方法:

假设原运动信号是 $f(t)$, 根据式(4)和式(5)对其进行小波分解,并将运动信号描述为式(3),那么就可将已增强的运动信号 $g(t)$ 描述为

$$g(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^m k_{j,i} d_{j,i} \psi_{j,i}(t) + \sum_{i=-\infty}^{\infty} r_i c_{m,i} \phi_{m,i}(t) \quad (6)$$

其中, $k_{j,i}$ 、 $c_{m,i}$ 是增强因子.

然后通过一个频带增益调节器,动画师就可以通过调节各个频带的增益来编辑捕获的运动.例如,给定一个正常走路的运动序列,通过调整左(右)髋关节点 $H_{L,ft}$ ($H_{R,ft}$) 和左(右)膝关节点 $K_{L,ft}$ ($K_{R,ft}$) 的运动信号低频部分,就可以实现不同步幅的走路运动编辑(见图 3),而通过调整左(右)肩关节点的运动信号低频部分,则可以生成不同摆幅的手臂运动.还有通过增强左(右)膝关节点关节点运动信号

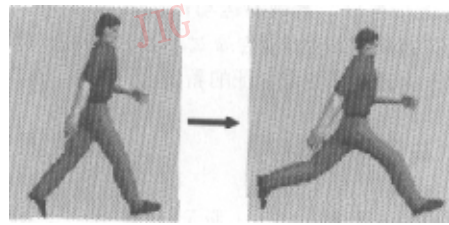
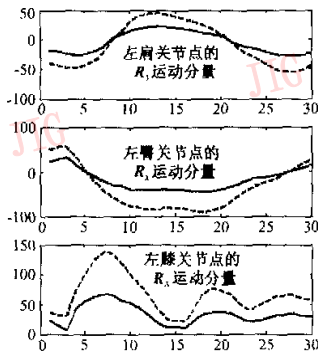


图 3 运动增强之步幅增大
左图横坐标表示帧数,纵坐标表示关节点绕所示方向轴旋转的角度

图 3 运动增强之步幅增大

的高频成分,就可以突出走路过程中的颤抖细节和生成战战兢兢的走路运动。

3.2 运动融合

所谓基于小波变换的运动融合,就是首先通过对输入的各个原始运动信号进行小波变换,以便将其分解在不同频段的特征域上;然后在各个特征域上,采用不同的融合算子进行融合来生成新的运动。

3.2.1 运动时间变形

在对运动进行分解和融合之前,必须对输入运动信号进行同步处理。例如,对于走路和跑步运动,它们步调必须一致。为此,这里引入音频处理中常用的时间变形(Time Warping)算法。

$$g(t) = f(h(t)) \tag{7}$$

其中, $h(t)$ 是时间变形函数,通常为线性分段函数, $f(t)$ 是原运动信号, $g(t)$ 是经过时间变形处理后的运动信号。对于任意两个运动信号,动画师首先指定几个时间对应点,并以其中一个运动信号作为参考信号来确定 $h(t)$, 然后根据式(7)来实现两个运动信号之间的同步(见图 4)。

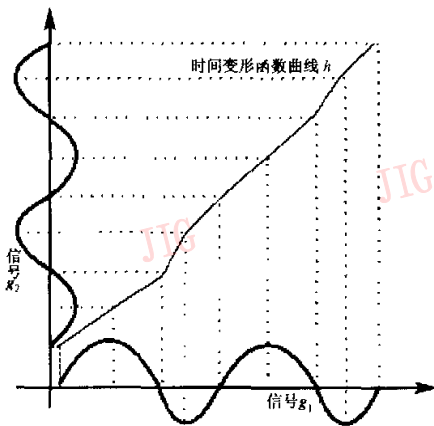


图 4 时间变形函数

以信号 g_2 为参考函数,则实现 g_1 与 g_2 同步的时间变形函数就是 h 。

$$g(t) = f_1(h(t)) \quad f \text{ 和 } g_2 \text{ 同步}$$

由于通常所分析处理的是离散运动数据,因此在对原运动信号的重采样过程中,有两个问题需要解决:①当 $h'(t)$ 小于 1 时,如何确定原运动中两帧运动数据之间的运动信息;②如何解决欠采样问题。对于前者,因为运动信号中前后两帧运动数据相隔时间比较短,所以通过线性插值或三次插值可以很好地解决;对于后者,特别当 $h'(t)$ 非常大时,则应选取其他运动作为参考运动,使 $h'(t)$ 变小。若对于只有两个运动的情况,则有 $h'(t) = (h'_0(t))^{-1} < 1$, 其

中, $h_0(t)$ 是初始时间变形函数。

3.2.2 基于小波变换的多尺度多算子运动融合

建立原运动信号之间的同步关系后,就可采用基于小波变换的融合算法来进行运动融合,算法描述如下:

(1) 对第 i 个输入运动信号中,关节点 l 的信号 $f_{i,l}(t)$ 进行小波分解,得到 $d_{i,l,j,k}$ 和 $c_{i,l,j,k}$ ($1 \leq j \leq m$), m 表示小波分解的层数。

$$\begin{aligned} d_{i,l,j,k} &= \langle f_{i,l}(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \\ c_{i,l,j,k} &= \langle f_{i,l}(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \end{aligned} \tag{8}$$

(2) 分别把融合算子 $\alpha_{i,l,j} = \{\alpha_{i,l,j,k}\}_{k \in Z}$ 作用于经小波分解得到的各运动信号的低频部分,从而得到融合运动的低频部分 $d_{i,l,j,k}$ 。

$$d_{i,l,j,k} = \sum_{k=-1}^n \alpha_{i,l,j,k} d_{i,l,j,k} \tag{9}$$

(3) 分别把融合算子 $\beta_{i,l,j} = \{\beta_{i,l,j,k}\}_{k \in Z}$ 作用于经小波分解得到的各个运动信号的高频部分,从而得到融合运动的高频部分 $c_{i,l,j,k}$ 。

$$c_{i,l,j,k} = \sum_{k=-1}^n \beta_{i,l,j,k} c_{i,l,j,k} \tag{10}$$

(4) 对所得融合运动信号的小波分解系数进行重构,即得到新运动信号。

采用上述算法来对偷偷摸摸走路运动信号和正常跑步运动信号进行融合,通过选择适当的融合算子,即可生成偷偷摸摸跑的运动信号(见图 5)。

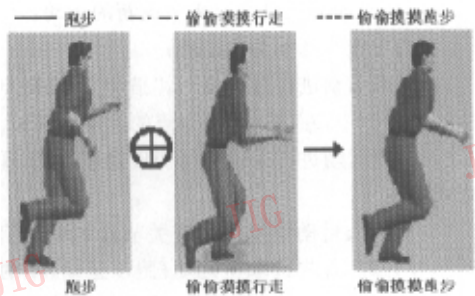
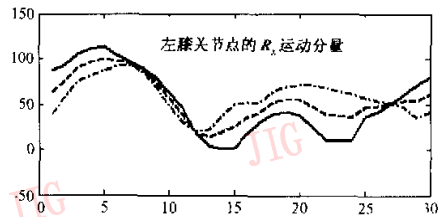


图 5 跑步与偷偷摸摸走运动的融合

3.3 运动特征提取与综合

在对运动信号进行频域分析时发现,运动信号中的不同频段成分反映了不同的运动特征,如果提取信号中与所需特征相对应的频段成分,然后与主运动信号综合起来,就可生成具有所需特征的新运动信号。

本文在进行运动特征提取与综合中,引入了常用的高低频互补算法(如图 6 所示),该算法首先对各输入运动信号进行分解,得到各自的近似部分和细节部分。其中,近似部分由具有低通滤波特性的尺度函数系数得到,反映的是对原运动的逼近;细节部分由具有带通特性的小波函数系数得到,反映的是原运动在某个频带上的信息。运动特征提取时,首先根据需要选取的主运动近似部分来反映新运动的基本特征,然后选取其他运动中的细节部分来反映新运动的细节特征,并由此组成一个新的小波分解系数,最后通过重构来生成所需要的运动。

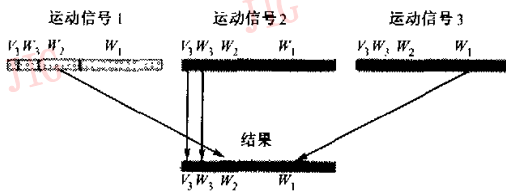


图 6 高低频互补算法示意图

由于所提取的只是运动信号中的部分特征,尤其是细节特征,因此原运动之间不需要相似,而运动之间的同步可通过 3.2.1 节中的运动时间变形算法来解决。

下面以从一个猫步运动中提取细节特征和从一个跑步运动中提取近似部分来生成一个“猫跑”的运动为例,详细说明在高低频互补算法中,如何提取所需运动特征和如何加以综合来生成新的运动:

(1) 确定跑步运动为主运动;

(2) 对原运动进行分析可知,“猫步”运动特点主要由运动模型中,左(右)髋关节的运动体现;

(3) 对原运动进行运动时间变形处理,以实现运动之间的同步;

(4) 对输入运动中左(右)髋关节的运动信号进行小波分解,首先选取主运动(跑步运动)中的近似部分作为新运动的近似部分,然后选取其中较低频段的高频部分作为新运动中的部分细节部分,其余细节部分从“猫步”运动中提取;

(5) 根据式(3)进行运动信号重建,得到具有“猫步”运动细节特征的新运动信号;

(6) 用得到的左(右)髋关节的新运动信号来替换输入跑步运动中的左(右)髋关节的运动信号,即得到“猫跑”运动信号(见图 7)。

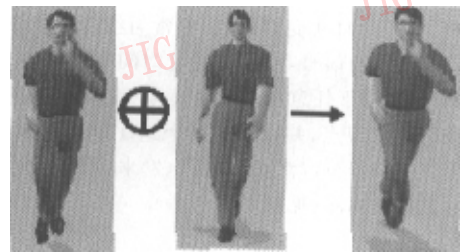
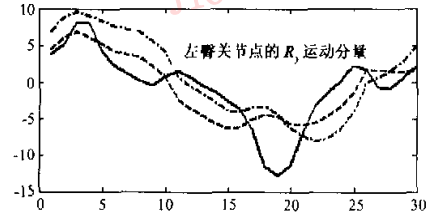


图 7 猫步特征提取

3.4 运动的真实感处理

由于人体的运动是 16 个关节运动的统一和协调,因此部分关节运动的改变,有可能破坏整体运动的真实性和自然性。例如,在 3.1 节中,通过调整左(右)髋关节和左(右)膝关节运动信号的低频部分,就生成了不同步幅的走路运动,但这些运动与场景不适应,即,若增大步幅,则产生运动打滑和腾空现象;而若减小步幅,则产生运动突进和脚陷入地面等问题。但通过对运动施加时空约束,能很好地解决这个问题,如 Gleicher, Popovic 和 Witkin 就在这方面作了大量的研究工作^[2-4,8]。

4 实验结果及讨论

整个算法采用 Matlab 工具实现,通过对各种输入运动进行的实验结果可见,效果较好。

4.1 运动增强实验分析

该分析是,先输入一个成年人走路的运动关键帧序列(如图 8(a)所示),然后通过增强该运动中,左(右)髋关节、左(右)膝关节的 R , 自由度和左(右)肩关节的 R , 自由度及关节运动中的低频

信号来增大运动的步幅,以生成自然的大步流星
走路运动(如图 8(c)所示).如果增强高频细节成

分,则可突出走路时的紧张心态(脚不停地颤抖)如
图 9 所示.

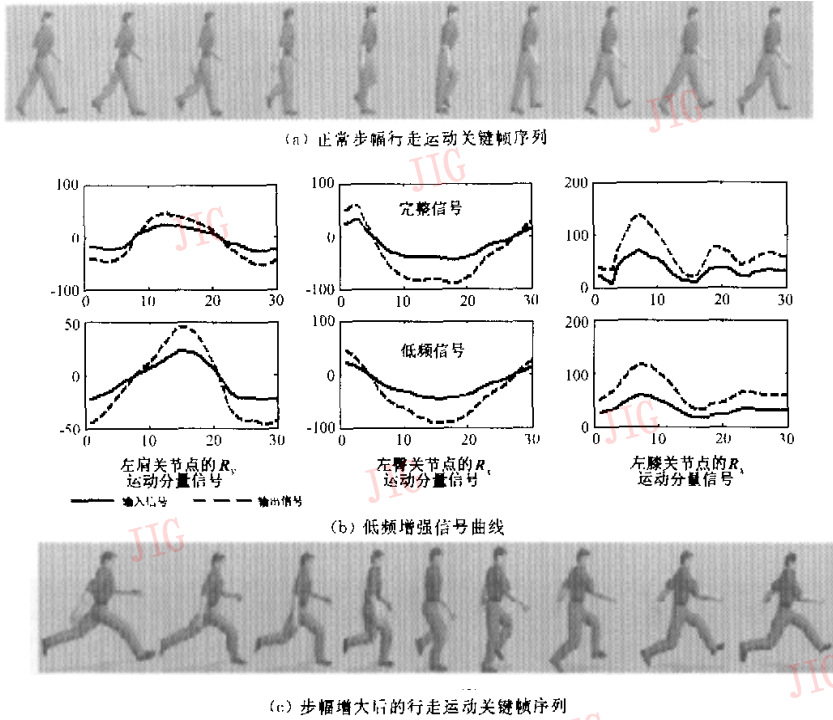


图 8 运动增强的步幅增大运动关键帧序列及其低频增强信号曲线

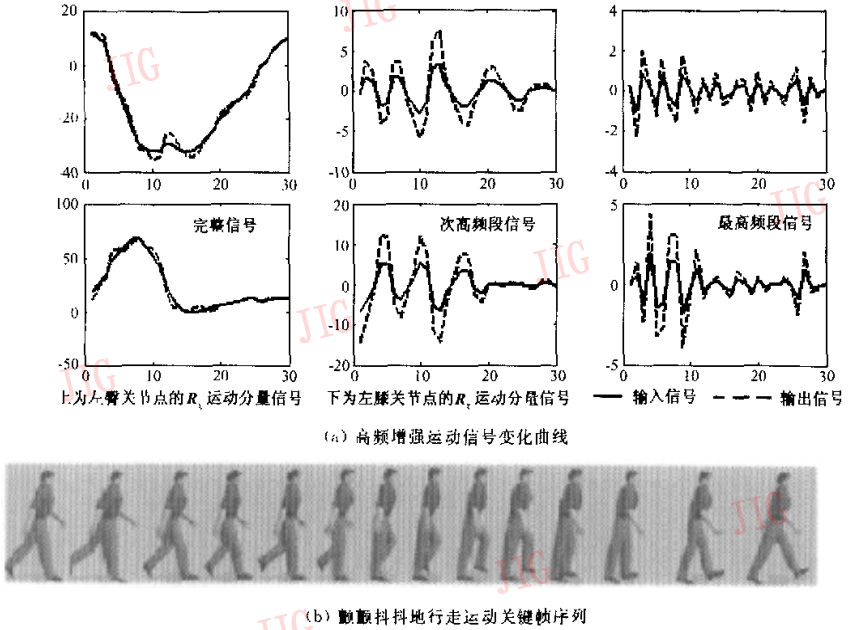


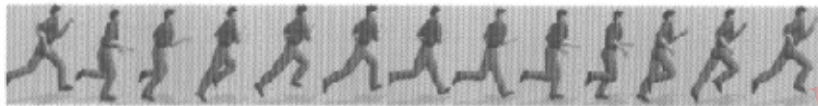
图 9 运动增强之颤颤抖抖地行走运动关键帧序列及高频增强运动信号变化曲线

4.2 运动融合实验分析

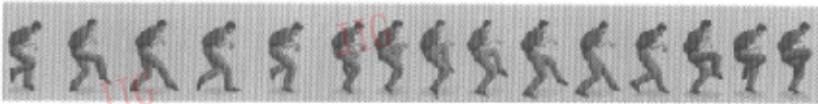
运动融合算法能有效地把具有不同特征的运动融合在一起,进而生成兼具各输入运动特征的新运动.由于小波变换具有多分辨率分析的良好特性,因此能在不同的特征域上,使用不同的融合因子来生成一系列满足不同特征要求的新运动.

例如,运动融合时,先输入一个正常跑步的运动序列,然后分别与具有不同风格的走路运动融合起来,即可生成具有与各个走路运动风格相对应的跑

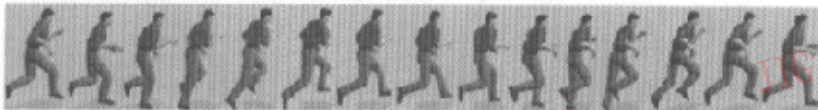
步运动.图 10(a)是输入的正常跑步的运动,图 10(b)、图 10(d)、图 10(f)显示了具有各种风格的走路运动,图 10(c)、图 10(e)、图 10(g)分别是相应的融合结果.通过运动融合,不仅能够对运动的姿势进行处理(如图 10(b)、图 10(c)、图 10(d)、图 10(e)),而且能分析处理运动对象的情感,例如图 10(f)、图 10(g)就把走路运动中那种轻松的心情融合进新的跑步运动中.



(a) 正常跑步运动关键帧序列



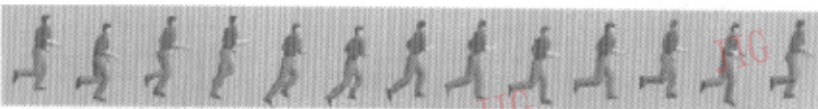
(b) 蹩手蹩脚地行走运动关键帧序列



(c) 蹩手蹩脚地跑运动关键帧序列



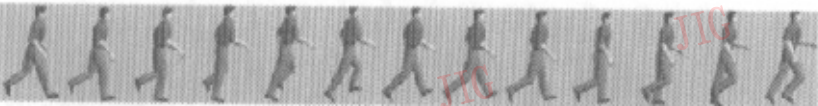
(d) 跳着走运动关键帧序列



(e) 跳着跑运动关键帧序列



(f) 轻松地走运动关键帧序列



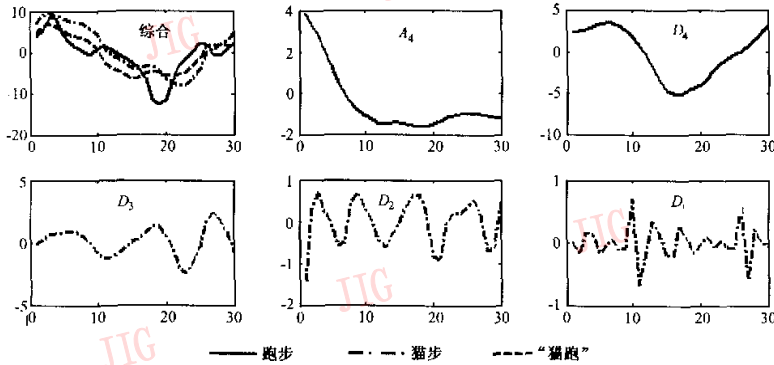
(g) 轻松地跑运动关键帧序列

图 10 运动融合

4.3 运动特征提取与综合实验分析

运用本算法,可以先提取运动的细节特征(通过运动信号的频域特征来反映),然后把提取到的特征与指定的主信号综合起来,以便使主运动具有相应的特征.例如,从“猫步”运动关键帧序列(图 11(b))中,先提取其中大腿左右摆动的特征,然后把它与一个跑步运动特征综合起来,即可形成跑“猫步”运动

(图 11(c)).实验分析时,先对输入的运动信号进行 4 层小波分解,再通过与“猫步”运动对应的大腿运动信号进行分析可知(图 11(a)), D_3 、 D_2 、 D_1 高频分量反映了“猫步”运动的特征,而选取这些细节特征与跑步运动中对应节点的 A_4 、 D_4 低频分量进行综合,其生成的新运动关键帧序列如图 11(c)所示.



(a) 高低频信号及互补综合信号曲线



(b) 猫步运动关键帧序列



(c) 跑猫步运动关键帧序列

图 11 特征提取与综合的“猫跑”

5 总结和展望

本文将小波变换理论引入到运动编辑中,即利用小波变换具有多分辨率分析的良好特性来在频域上对运动进行分析处理,并提出了一系列新的运动编辑算法,其中主要包括运动增强、运动融合和运动特征提取与综合等.这些算法非常适合于对运动特征进行处理,由于这些算法能够在高层次上,对运动进行有效的编辑,因而极大地提高了动画师的工作效率.下一步工作包括:

(1) 将时空域分析与频域分析结合起来进行运

动编辑,以提高运动对场景的适应性;

(2) 对运动的物理特性(着地的力度等)进行分析,以增强运动的真实感;

(3) 研究运动角色部分关节运动的改变,对其他关节运动的影响,以增强运动的协调性.

参考文献

- 1 Michael Gleicher. Animation from observation: Motion capture and motion editing[J]. Computer Graphics, 1999, 4(33): 51 ~ 35.
- 2 Michael Gleicher. Motion editing with spacetime constraints [A]. In: Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics[C]. Providence, Rhode Island, USA: ACM, 1997: 139

~ 118.

3 Michael Gleicher, Peter Litwinowicz. Constraint-based motion adaptation [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1998,9(2):65~94.

4 Michael Gleicher. Retargeting motion to new characters[A]. In: Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics[C], Orlando, Florida USA: ACM, 1998;33~42.

5 Jeehe Lee, Sung Yong Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures [A]. In: Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics[C]. Los Angeles, USA: ACM, 1999;39~48.

6 Brotman I. S., Netravali A. N. Motion interpolation by optimal control[J]. Computer Graphics, 1988,22(4):309~315.

7 Cohen M F. Interactive spacetime control of animation [J]. Computer Graphics, 1992,26(2):293~302.

8 Zoran Popovic, Andrew Witkin. Physically based motion transformation [A]. In: Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics[C]. Los Angeles, USA: ACM, 1999;11~20.

9 Bruderlin A, Williams J. Motion signal processing [A]. In: Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics[C]. Los Angeles, USA: ACM, 1995;97~104.

10 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[C]. Los Angeles, USA: ACM, 1995;91~96.

11 Rose C, Cohen M F, Bodenheimer B. Verbs and Adverbs: Multidimensional motion interpolation[J]. IEEE CG &A, 1998, 18(5):32~40.

12 Witkin A, Popovic Z. Motion warping[A]. In: Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics[C]. Los Angeles USA: ACM, 1995;105~108.

13 Matthew Brand, Aaron Hertzmann. Style machine [A]. In: Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics[C]. New Orleans, USA: ACM, 2000;183~192.



刘丰 1979年生,硕士研究生.主要研究方向为多媒体技术.



庄越挺 1965年生,教授,博士生导师.主要研究方向为多媒体技术、智能CAD.



潘云鹤 1946年生,教授,博士生导师,院士.主要研究方向为计算机美术、形象思维、智能CAD系统、GIS、计算机动画、多媒体技术等.



罗忠祥 1976年生,博士研究生.主要研究方向为多媒体技术.