

文章编号: 1005-0523(2006)04-0036-04

虚拟人的运动建模与仿真

涂晓斌, 蒋先刚, 刘二根

(华东交通大学 基础科学学院, 江西 南昌, 330013)

摘要: 依据人体的关节连接体层次结构, 将各肢体抽象为简单的刚性几何实体, 并运用 VRML 构建了人体骨骼模型的样本. 各肢体的骨骼模型可在此样本模型的基础上经变换而获取; 为了描述人体骨骼模型中各关节之间的相对位置和姿态的变化, 本文定义了 3 类坐标系, 并详细论述了求解各关节运动参数方法; 最后利用 VRML 构建了一个虚拟人体骨骼运动的实例.

关键词: 人体运动; 人体骨架; 虚拟现实; VRML

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

0 引言

虚拟人是完全由计算机表示, 看起来像真人的图形实体, 即人的计算机模型. 对虚拟人的需求主要来自工程、设计、教育、训练、交互、通信、医学、体育、文体交流等各个领域, 因此, 虚拟人的研究具有无限广阔的应用前景.

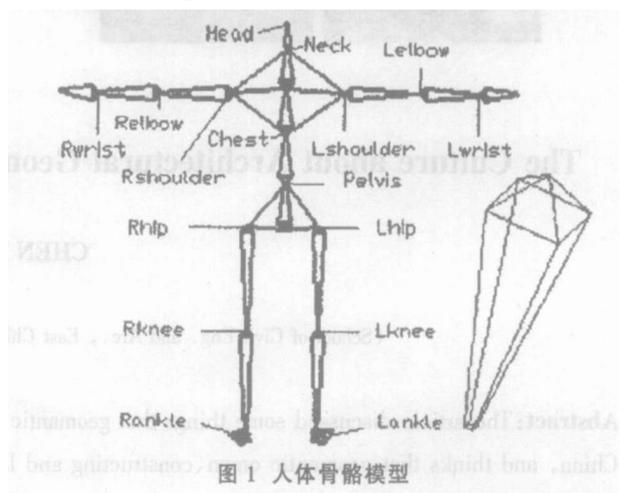
1 虚拟人的骨架模型

人体运动系统由骨、骨连接和骨骼肌通过运动关节组成, 骨骼外面附着皮肤, 可跟随骨骼一起运动. 人体的动作不是由骨骼自身的变化引起, 而是由连接在关节上的骨骼的位置和方向的变化所决定. 运动中各骨骼的长度和形状是不变的, 通过关节连在一起. 身体各部分在神经系统的调节和其他系统的配合下, 在空间运动并使各骨骼在空间的相对位置发生改变. 由于可指定骨骼的形状和连接骨骼的关节属性, 所以用骨架模型来构建人体几何模型是可以的. 围绕着人体的活动, 主要涉及人体 6 个肢体部分, 即手掌、前臂、上臂、躯干(包括头和颈)、大腿和小腿. 根据人体体质的特征, 可知人体的质心在其身高的 $5/9$ 位置, 人体 6 个肢体部分的参数如表 1 所示.

表 1 人体 6 个肢体部分的参数(身高用 H 表示)

部位	长度	回转半径	质心位置
手掌	$l_1=0.108 H$	$\rho_1=0.587 l_1$	$C_1=0.6306 l_1$
前臂	$l_2=0.151 H$	$\rho_2=0.526 l_2$	$C_2=0.4306 l_2$
上臂	$l_3=0.202 H$	$\rho_3=0.542 l_3$	$C_3=0.5506 l_3$
大腿	$l_4=0.211 H$	$\rho_4=0.540 l_4$	$C_4=0.455 l_4$
小腿	$l_5=0.237 H$	$\rho_5=0.528 l_5$	$C_5=0.4049 l_5$
躯干	$l_6=0.545 H$	$\rho_6=0.830 l_6$	$C_6=0.660 l_6$

骨架模型是将人体表示为一组关节和肢体的集合, 根据表 1 提供的参数, 将人体骨架模型简化为 17 个关节共 37 个自由度, 如图 1(左)所示. 文本运用 VRML 构造人体骨架虚拟模型, 为减少程序编码, 可先构造出人体骨骼模型的样本如图 1(右)所示. 人体各肢体的骨骼模型可由此样本模型经变换而获取, 构建样本骨骼模型的 VRML 程序代码如下:



收稿日期: 2005-10-08

作者简介: 涂晓斌(1967-)男, 江西南昌人, 副教授.

```
#VRML V2.0 utf8 人体标准骨骼模型.
DEF Bone01 Transform {
translation 0 0 0
rotation 0 0.7071 0.7071 -3.142
children [
shape {appearance Appearance
{material Material {}}
geometry DEF Bone01-FACES IndexedFaceSet {
ccw TRUE
solid TRUE
coord DEF Bone01-COORD Coordinate { point
[5 5 5, 5 5 -5, 5 5 -5, 5 5 -5, 26.4 0.5 0.5, 26.4 0.5
-0.5, 26.4 -0.5 -0.5, 26.4 -0.5 0.5, 0 0 0] }
coordIndex [4, 7, 5, -1, 6, 5, 7, -1, 1, 5, 2, -1, 6,
2, 5, -1, 0, 4, 1, -1, 5, 1, 4, -1, 7, 3, 6, -1, 2, 6,
3, -1, 4, 0, 7, -1, 3, 7, 0, -1, 8, 0, 1, -1, 8, 1, 2,
-1, 8, 2, 3, -1, 8, 3, 0, -1] } } }
```

2 虚拟人的运动建模

为准确地描述人体模型中各肢体之间的运动连带关系,文本以腰关节 Pelvis 为根结点,对于相邻的两个关节,设定靠近根结点 Pelvis 的关节为父结点,连接在父结点之下的关节就设定为子结点.这样,可用树形结构来表达人体关节的层次结构,结果如图 2 所示.

整个人体的运动可以看成是由平移和旋转组成,即 Pelvis 点的平动,以及树上的各结点绕父结点的旋转, Pelvis 点的旋转决定人体模型的方向,其他各结点的旋转是以父结点为坐标原点的相对坐标系的旋转.各个关节的位置可以根据骨架长度和旋转向量求出,如图 1 中的结点 Rankle, 其位置与旋转向量的对应关系为:

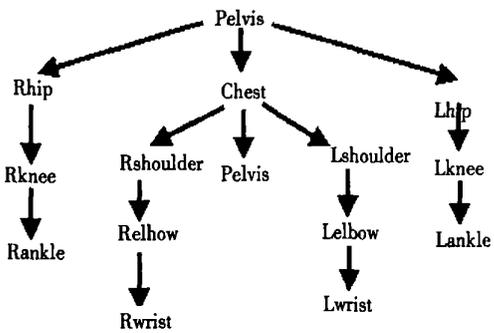


图 2 人体关节的层次结构

$$P_{Rankle}(x, y, z) = T_{Pelvis} R_{Pelvis} T_{Rhip} R_{Rhip} T_{Rknee} R_{Rknee} T_{Rankle} R_{Rankle} P_0(x, y, z) \dots \dots (1)$$

其中 $P_{Rankle}(x, y, z)$ 表示关节点在世界坐标系下的坐标; $P_0(x, y, z)$ 表示关节点在初始位置时以 Rankle 点为原点的相对坐标系下的相对坐标; T_i 表示 i 结点从当前坐标系平移到父结点坐标系下的平移向量, 平移向量可以根据人体模型的骨架长度直接求出; R_i 表示 i 结点绕父结点的旋转向

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, 决定该段骨架的方向.

由(1)式可知, 每个关节点的运动除了包括绕父结点旋转外, 还包括随父结点绕父结点之父结点的旋转和平移. 因此, 三维数据向旋转平移转化的关键是在各个非叶子结点处建立以该结点为原点的参考坐标系, 各个参考坐标系是根据原点和其叶子结点组成的刚体确定其方向. 本文定义了 3 类坐标系: 世界坐标系、人体基坐标系、和各关节的局部坐标系. 人体坐标系的设定规则如下: 取人体腰关节为人体质心, 在此处设立人体基坐标系, 使基坐标系的原点位于腰关节, 基坐标系的方向与世界坐标系各轴的方向保持一致. 由腰关节出发, 沿人体关节连接的次序设立各关节的局部坐标系, 取关节轴方向为 Z 轴的正方向, 取上一关节和该关节的连线方向为 X 轴的正方向, 然后按照右手规则确立 Y 轴的方向. 世界坐标系、人体基坐标系(腰关节)及左股关节、左膝关节的局部坐标系如图 3 所示. 另外, 规则规定各肢体绕每个坐标轴转动时, 从该轴的正方向看, 逆时针方向为正, 顺时针方向为负; 并且设定人体的起始姿态为直立姿态, 所有的动作角度均为相对于初始姿态的角度.

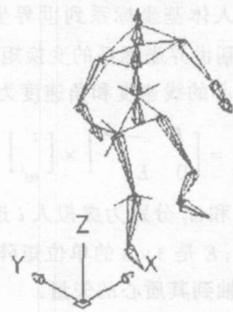


图 3 坐标系的设定

- 文本所用的符号约定如下:
- Σ_w : 世界坐标系;
- Σ_o : 人体基坐标系;
- Σ_i : 固定于虚拟人关节 i 的连杆坐标系;
- m^i : 虚拟人 i 连杆的质量, 第 0 个连杆是指基本体;
- I^i : 在 Σ_i 中, i 连杆相对于其质心的转动惯量;
- v^i : 在 Σ_i 中, i 连杆关节轴的线速度;
- ω^i : 在 Σ_i 中, i 连杆关节轴的角速度;
- v_c^i : 在 Σ_i 中, i 连杆质心的线速度;
- ω_c^i : 在 Σ_i 中, i 连杆质心的角速度;
- l_i : 连杆 i 的长度;
- f^i : 作用在连杆 i 质心的力;
- τ^i : 连杆关节 i 的驱动力矩;
- r_o : 世界坐标系原点指向虚拟人质心位置的矢量;
- r_c^i : 惯性坐标系原点指向虚拟人 i 连杆质心的矢量.

下面给出文本用到的算符, 记矢量 $U = [x \ y \ z]^T$, 矢量算符如下:

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$$

为了定义相邻坐标系之间的变换,在此使用了4个参数:连杆长度 a , 连杆扭角 α , 连杆之间的距离 d , 以及连杆之间的角度 θ . 这样相邻坐标系 $i-1$ 和 i 之间的变换 T_i^{i-1} 可用齐次坐标变换表示为:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} n & 0 & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots (2)$$

式中, $n_x = \cos \theta_i, n_y = \sin \theta_i, n_z = 0$

$o_x = -\cos \alpha_i \sin \theta_i, o_y = \cos \alpha_i \cos \theta_i, o_z = \sin \alpha_i$

$a_x = \sin \alpha_i \sin \theta_i, a_y = -\sin \alpha_i \cos \theta_i, a_z = \cos \alpha_i$

$p_x = a_i \cos \theta_i, p_y = -a_i \sin \theta_i, p_z = d_i$

通过重复使用相邻连杆之间的坐标变换,可以很方便地得到两个坐标系 i 和 j 之间的关系:

$$T_j^i = T_{i+1}^i T_{i+2}^{i+1} \dots T_j^{j-1} \dots\dots (3)$$

由式(2)和式(3),对于某一任务,运动的限定可用下式给出:

$$T_0^0 T_1^0 T_2^1 \dots T_n^{n-1} = T_n^0 \dots\dots (4)$$

式中: T_i^{i-1} 表示从 i 关节的坐标系到 $i-1$ 关节的坐标系的变换矩阵; T_0^0 是人体基坐标系到世界坐标系的变换矩阵; T_n^0 是目标坐标系到世界坐标系的变换矩阵.

虚拟人 i 连杆质心的线速度和角速度为:

$$\begin{bmatrix} v_c^i \\ \omega_j^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & -P^i \\ 0 & E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v^i \\ \omega_j^i \end{bmatrix}$$

式中: v^i 和 ω_j^i, v_c^i 和 ω_c^i 分别为虚拟人 i 连杆关节轴与质心的线速度和角速度; E 是 3×3 的单位矩阵; P^i 是 i 连杆坐标系中从 i 连杆关节轴到其质心的矢量.

i 连杆关节速度 V^i 可以表示为:

$$V^i = \hat{S}_{i-1}^i v^{i-1} + n^i \dot{\phi}^i \dots\dots (5)$$

式中: $V^i = [v^i \quad \omega^i]^T$; $\dot{\phi}^i$ 是虚拟人 i 关节的角速度, $n^i = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$, 且

$$\hat{S}_{i-1}^i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^i & -R_{i-1}^i \tilde{l}_{i-1}^i \\ 0 & R_{i-1}^i \end{bmatrix}$$

式中: R_{i-1}^i 是 $i-1$ 连杆坐标系相对于 i 连杆坐标系的旋转矩阵, \tilde{l}_{i-1}^i 是 $i-1$ 连杆坐标系原点到 i 连杆坐标系原点的矢量在 $i-1$ 连杆坐标系中的表示. \hat{S}_i^k 具有如下特性: $\hat{S}_s^m \hat{S}_p^s = \hat{S}_p^m$, 对 $\forall m, s, p \subset n$, 且 $\hat{S}_m^m = E, E$ 是单位矩阵.

虚拟人的运动是一个时变函数,它描述了虚拟人在某一时刻的姿态.为在给定初始运动 $m(0)$ 和一组约束 C 条件下得到满足约束 C 的目标运动 $m_g(t)$, 需引入2种运动间差异的规整函数:

$$\omega(t) = m(t) \ominus m(0) = (v^0(t), \dots, v^n(t))^T$$

$$v^i(t) \in \mathcal{S}^3, 0 \leq i \leq n.$$

通过对初始运动应用规则函数,可以得到新的运动 $m(t) = m(0) \oplus \omega(t)$

动细节,为此,应考虑把规整函数表示为定义在结点上的多级 B -样条函数,每级 B -样条曲线描述了对应关节的时变运动偏移,并在提炼结点序列的过程中加入运动细节信息.利用适当的结点序列,可以找到精确满足 C 中的有约束的解.

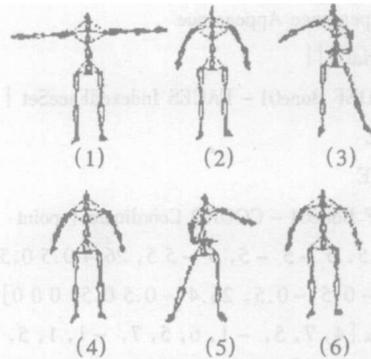


图4 虚拟人体做操动作的骨架模型

3 虚拟人的骨架运动实例

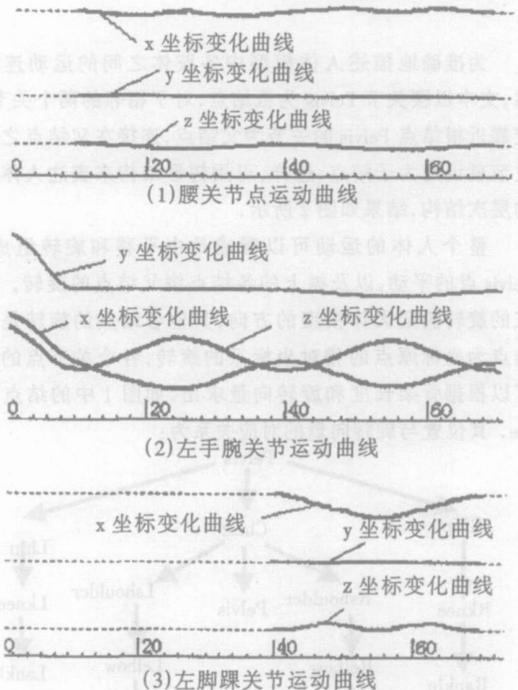


图5 部分关节在世界坐标系下的运动曲线

限于篇幅,图4仅列出了模仿人做操时几个简单动作的骨架模型.图5列出了虚拟人运动时部分关节的在世界坐标系下的 x, y, z 坐标变化曲线(采用 B -样条拟合而成),横坐标表示时间轴,纵坐标表示关节点的坐标变化情况.根据图5中的数据可以用 VRML 编程实现虚拟人体的骨架运动过程.图6为虚拟人体的骨架运动过程的场景树.

其中,虚拟人的左腿运动过程的 VRML 代码如下:

虚拟人的左腿运动过程

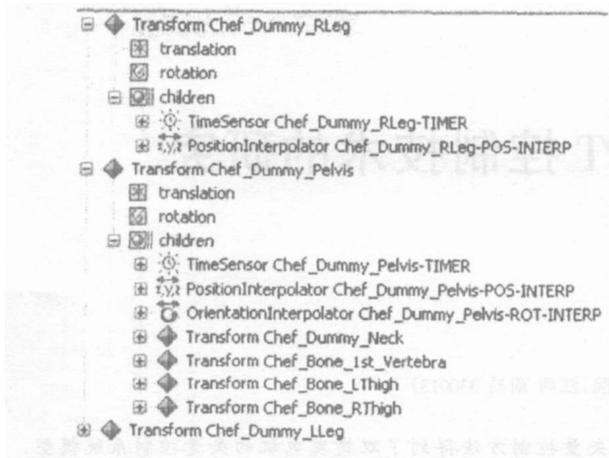


图6 虚拟人体的骨架运动过程的场景树

```

DEF Chef __Dummy __RLeg Transform {
translation 156.7 -261 2.336
rotation 0 -1 0 -1.571
children [
DEF Chef __Dummy __RLeg -TIMER TimeSensor { loop
TRUE cycleInterval 3.333 },
DEF Chef __Dummy __RLeg-POS-INTERP
PositionInterpolator {
key [0, 0.39, 0.42, 0.45, 0.48, 0.51, 0.54, 0.57, 0.
6, 0.63, 0.66, 0.69, 0.72, ]
keyValue [156.7 -261 2.336, 156.7 -261 2.336, 153.4
-258.4 2.336, 140.6 -249.9 2.336, 126.9 -244.8 2.336,
113.8 -251.1 2.336, 103.5 -260.1 2.336, 105.9 -257.8
2.336, 118.4 -248 2.336, 131 -245.5 2.336, 145.4 -252.
9 2.336, 155.8 -260.3 2.336, 156.7 -261 2.336, ] },
]
}

```

Modelling and Simulation of Virtual Moving Human

TU Xiao-bin, JIANG Xian-gang, LIU Er-ge

(School of Nature Science, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013 China)

Abstract: This paper states the way to reconstruct human skeleton model by VRML technologies. It considers human's limb's as simple and abstract rigid geometric bodies based on human body's arthrosis construction. All skeleton models can be gained by template models and their transformations. In order to describe relative positions and postures between human skeleton, it defines 3 kinds of coordinate system, it also discusses detailedly the way to gain each arthrosis moving parameters. Finally it constructs a actual virtual moving human skeleton model by VRML.

Key words: human motion; human skeleton; virtual reality; VRML.

```

ROUTE Chef __Dummy __RLeg -TIMER -fraction __changed
TO Chef __Dummy __RLeg -POS -INTERP -set __fraction
ROUTE Chef __Dummy __RLeg -POS -INTERP -value __
changed TO Chef __Dummy __RLeg -set __translation }

```

4 结束语

本文根据对人体运动结构的分析以及人体测量所得的数据,构建了人体的骨架模型.为虚拟人的骨骼运动过程,本文定义了三类坐标系用于描述人体骨架模型中各关节之间的相对位置,并用 VRML 构造了一个虚拟人体做操时各骨骼运动动画.从实验的结果来看,文本得到三维运动骨架的效果较好,今后,还将研究如何给人体三维骨架加上肌肉和皮肤,这样从各个角度看到的人体运动将会更加逼真.

参考文献:

- [1] 庄越挺,等.运动图像序列的人体三维运动骨架重建[J].计算机辅助设计与图形学学报,2000,(12):245~250.
- [2] 韦有双,杨湘龙,王飞.虚拟现实与系统仿真[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [3] 宋顺林,等.三维人体行走模型的研究与实现[J].计算机学报,1996.6:429~434.
- [4] 洪炳,等.虚拟现实及其应用[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [5] 罗忠祥,等.基于视频的人体动画[J].计算机研究与发展,2003(2):269~276.