

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1008-07

论文索引信息: 郝爱民, 赵永涛, 吴伟和, 朱诗武. 任意姿态虚拟人网格模型骨骼提取算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1008-1014

任意姿态虚拟人网格模型骨骼提取算法

郝爱民, 赵永涛, 吴伟和, 朱诗武

(北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

摘要: 人体骨骼动画技术是虚拟人物建模中的研究重点。在现有人体骨骼动画的制作过程中, 动画师必需手工标定人体各主要关节位置及人体骨架每一关键帧的姿态, 工作量巨大。因此提出一种自动提取人体任意姿态网格模型骨架结构的方法。该方法首先利用模型各顶点间测地距离的几何关系自动识别人体位于四肢和头顶末端的5个特征点, 再以特征点为起点生成等测地距离曲线族, 利用等测地距离曲线将人体四肢和躯干区分开来, 将这些相邻等测地线中心连接起来生成5条骨骼中心线, 最后在中心线上根据中心夹角极小值及等测地距离曲线似圆率来确定人体关节的确切位置。实验结果表明, 该算法能适应不同姿态的人体模型, 计算结果准确性高, 能完全自动实现关节点定位和骨骼提取。

关键词: 虚拟人体模型; 姿态无关性; 测地距离; 骨骼提取

Pose-independent skeleton extraction from virtual human model

Hao Aimin, Zhao Yongtao, Wu Weihe, Zhu Shiwu

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191 China)

Abstract: Animating human bodies becomes one of the most active research fields in virtual human modeling. Animating an articulated three dimensional human model currently requires manual rigging to specify its internal skeletal structure and to define how the input motion deforms its surface. Manual rigging is too tedious, and sensitive to the pose of the model. So in this paper, we present an automatic pose-independent method to extract skeleton of human model. This method based on geodesic distance of human body model first extracts and recognizes five feature points at the end points of head and limbs on human body surface, and calculates the geodesic distances of vertices in the model from the feature points. It then constructs the central lines through the centers of geodesic distance isolines, and finds joint positions by analyzing the angles or circularity function of geodesic isolines of the model according to bent or unbent joints. Our experiments show that, this method can identify joint positions and extract the skeleton automatically, with high precision, and in a pose-independent manner.

Keywords: virtual human body model; pose-independent; geodesic distance; skeleton extraction

0 引言

目前作为计算机图形学与人体仿生学结合的产

物, 3维人体骨骼动画已经发展成一个具有数百亿美元年产值的行业, 在游戏、广告、影视及军事等领域都有广泛应用。但是由于缺乏高效的动画制作工具, 3维人体骨骼动画的制作过程中, 需要人工标定

收稿日期: 2010-06-03; 修回日期: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(60533070); 中央高校基本科研业务费专项项目(2010-BH-J032)。

第一作者简介: 郝爱民(1968—), 男, 教授。2006年于北京航空航天大学获得计算机应用技术博士学位, 研究方向为计算机图形学、3维逼真和实时绘制, 主持了国家科技攻关科技奥运专项“2008年北京奥运会开闭幕式创意仿真平台及逼真演示环境开发”、国家高技术研究发展计划(863)项目“通用网络游戏引擎及示范应用”、教育振兴计划“数字图书馆中3维资源建设及示范应用”等20余项。E-mail: ham_buaa@163.com。

人体各主要关节位置及人体骨架每一关键帧的姿态。因此利用虚拟人模型点、边、面等信息,自动提取人体模型骨架结构的方法成为学者们研究的热点。现有的 3 维人体模型骨骼提取方法在定位精度、计算效率、模型姿态、鲁棒性等方面存在一些问题。提出一种自动提取人体任意姿态网格模型骨架结构的方法,该方法能适应不同姿态的人体模型,计算结果准确性高,能完全自动实现关节定位。

1 相关研究

由于人体模型的复杂性和不规则性,及人体姿态变化的多样性,使得模型骨骼的自动提取非常困难。近年来出现的人体模型骨骼提取的算法主要分为两类:基于动态模型的算法和基于静态模型的算法。

动态模型由表示同一个人体的不同姿态的动画序列组成,每一姿态对应一组顶点数据,大致研究思路是选其中一个姿态为参考姿态,以面、边或顶点为基本单位,计算参考姿态到其他姿态间的变化量或变换矩阵,基于这种变化量或变换矩阵对顶点或面进行聚类,根据类的邻接情况确定关节位置。Edilson^[1]及 Tierny^[2]都提出基于动态模型的骨骼提取算法。但这些方法都以动画序列数据为前提,要求的数据量大,需要进行不同姿态间顶点注册等烦琐的数据预处理,关节定位的精度与动画数据能否完全反映各关节的运动情况相关。

静态模型是指只有一个表示人体某一特定姿态的人体模型,基于静态模型的算法通过对模型的几何特征分析来提取关节位置。与动态模型相比,数据量少,计算速度快,但是精度会受一些影响。Nurre^[3]提出利用一组水平截面将直立模型截取为多层轮廓,并根据每层截面轮廓的凸包的位置与尺寸来确定人体结构。Ju^[4]利用一组水平截面截取人体模型,根据各层截面信息将模型分为四肢和躯干等 5 个部分,基于每个部分中截面椭圆轮廓的周长变化规律,提取出每个部分所包含的关节。胡晓雁等人^[5]提出的基于语义分析的懒匹配算法(LMSA)对模型用等距取截面生成备选关节集,再根据运动文件的语义信息确定关节。Joao 等人^[6]利用扫描模型的水平截面信息,提取模型的中心线,根据局部曲率提取人体局部特征点,再利用局部特征点与关节的关系在中心线上定位关节位

置。这 4 种算法^[3-6]均采用水平截面截取模型,其计算结果随模型姿态、体形等因素的改变而变化,当人体模型姿态与标准姿态相差较大时,无法获取正确的拓扑结构。Dekker 等人^[7]以及文献[6]在模型表面解析出一系列标记点(landmark),借助这些标记点来生成骨架,但这类方法需要人工干预,不能实现完全自动化的骨骼提取。Katz 等人^[8]以相邻两个面质心间的测地距离和相邻两个面的两面角的加权组合作为特征,以组成模型的面为单位进行聚类。将每一类面边界的中心作为关节位置,这种算法不适宜关节非弯曲的模型。Werghi 等人^[9]将人体表面各点之间测地线距离作为 Morse 函数,构造了离散 Reeb 图(DRG),根据该图以及人体测量学的先验知识实现了任意姿态扫描人体模型的分块。但该算法只完成了人体模型的分块,并没有实现关节中心的提取。于勇等人^[10]同样采用基于测地距离的方法获得人体拓扑结构,通过轮廓似圆性函数进行骨骼关节定位,能够实现姿态无关的关节提取。虽然该算法是基于人体解剖学的假设,模型的关节附近截面形状呈现不规则形状,而骨骼中部呈现类圆性,但由于该算法的截面完全是从头顶开始计算测地距离,因此截面轮廓与医学所指截面存在偏差,另外,仅根据一个截面的似圆性构造出的 1 维判据,其抗干扰性差,易受姿态、模型精度等影响。

2 姿态无关骨骼提取算法

2.1 算法概述

针对任意姿态的人体静态模型展开骨骼提取算法的研究。算法的总体思路是:首先利用模型各顶点间测地距离的几何关系自动识别人体位于四肢和头顶末端的 5 个特征点,以头部特征点为起点生成等测地距离曲线族,根据同一层次封闭的等测地距离曲线的个数将人体的四肢与躯干区分开来,再以四肢的各特征点为起点生成在四肢上的等测地距离曲线,之后将这些相邻等测地线中心连接起来生成 5 条骨骼中心线,在中心线上针对弯曲和非弯曲关节,分别采用中心夹角极小值及等测地距离曲线似圆率来确定人体关节的确切位置。算法流程示意图如图 1。算法分步计算结果如图 2,其中(a)为输入模型。

测地距离及测地距离等值曲线的定义如下。

定义 1 (测地距离)连接曲面上给定两点之间

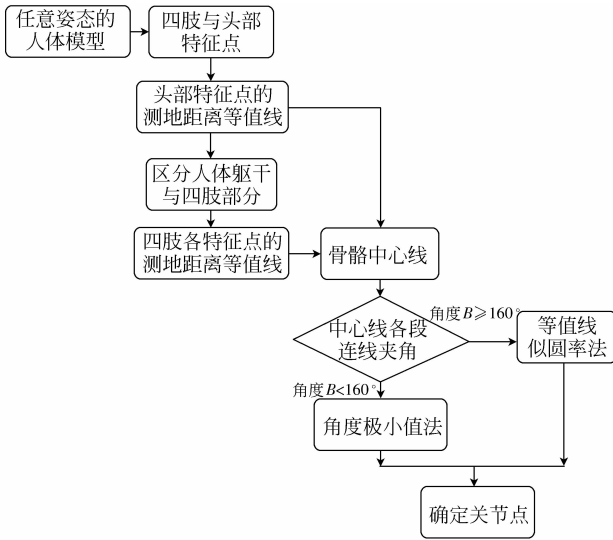


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of our method

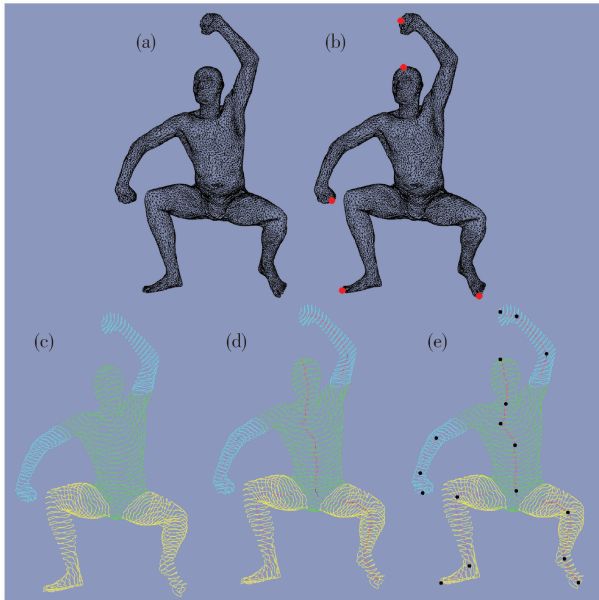


图 2 算法分步计算结果图

Fig. 2 Overview of our algorithm

最短路径的长度,即为这两点的测地距离,用 $g(x, y)$ 表示点 x 和 y 之间的测地距离。

定义 2 (测地距离等值曲线)到模型当中某一点测地距离相等且相互连通的点依次连接而形成的封闭曲线。

我们把整个虚拟人模型看做一个完全连通图,模型顶点 x 与顶点 y 的测地距离用 Dijkstra 求得的两点最短距离来近似。图 3 为展开的三角网格图,假设点 o 为特征点,点 a 至点 n 到 o 的测地距离都

相等,大小为 D ,且相互连通,将点 a 至点 n 依次连接所形成的闭合曲线即为测地距离为 D 的等值曲线。

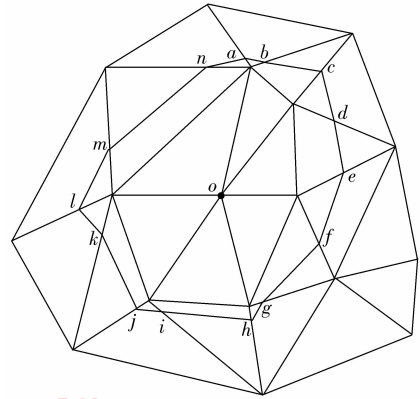


图 3 测地距离等值曲线

Fig. 3 Geodesic distance isolines

2.2 特征点提取和识别

模型特征点是指位于头部和四肢末端的顶点,本文将分别以这些特征点为起点计算模型各点的等测地距离曲线,实现关节点定位。特征点提取方法采用于勇等人^[10]的提取方法。图 2(b)为特征点提取结果。在求得 5 个特征点之后,由人体生理学特征可知头到手的测地距离小于任意其他两个特征点间的测地距离,即手手、手脚,头脚,脚脚间的测地距离都要大于头手间的测地距离,再根据人体模型的对称性便可识别出头部、手部和脚部的特征点,最后根据同侧手脚距离小于异侧手脚距离,可判断手脚特征点是否位于同侧或异侧。算法描述如下。

1) 特征点集 F 中任取两个特征点使它们的测地距离最小,其中

$$d_f = \operatorname{argmin}(g(f_i, f_j)) \quad f_i, f_j \in F$$

2) 再从特征点集中任取两个特征点使它们的测地距离第二小,即仅次于 d_f ,

$$d_s = \operatorname{argsecondmin}(g(f_k, f_l)) \quad f_k, f_l \in F$$

3) 根据人体模型对称性求得头部特征点 f_h 及两个手部特征点 f_{a1}, f_{a2} 。

IF ($f_i == f_k$)

$$f_h = f_i = f_k; f_{a1} = f_j; f_{a2} = f_l;$$

ELSE IF ($f_i == f_l$)

$$f_h = f_i = f_l; f_{a1} = f_j; f_{a2} = f_k;$$

ELSE IF ($f_j == f_k$)

$$f_h = f_j = f_k; f_{a1} = f_i; f_{a2} = f_l;$$

ELSE

$$f_h = f_j = f_l; f_{a1} = f_i; f_{a2} = f_k;$$

4) 特征点集 F 中另外两个特征点即为脚部特征点 f_{11}, f_{12} ;

5) 根据同侧手脚距离小于异侧手脚距离判断各特征点位于同侧或异侧:

```
IF( $g(f_{a1}, f_{11}) < g(f_{a1}, f_{12})$ )
     $f_{a1}$ 与 $f_{11}$ 同侧; $f_{a2}$ 与 $f_{12}$ 同侧;
ELSE
     $f_{a1}$ 与 $f_{12}$ 同侧; $f_{a2}$ 与 $f_{11}$ 同侧;
```

2.3 生成骨骼中心线

本方法将分两步生成骨骼中心线,首先以头顶的特征点为起点,生成躯干的骨骼中心线,并确定四肢与躯干相连接的界限;之后再以四肢各特征点为起点,确定四肢的骨骼中心线。

本算法首先以头顶点为起点,依次确定 N 个层次的测地距离等值曲线,每层等值曲线相差的距离为 d 。其中 d 的确定方法如下:

1) 求得特征点集中各特征点最大的测地距离长度

$$d_{\max} = \arg \max(g(f_i, f_j)) \quad f_i, f_j \in F$$

2) 计算每层等值曲线相差的距离

$$d = d_{\max} / N, N \text{ 通常取值在 } 100 \sim 200。$$

求得每层等值曲线相差的距离后,就可以以头顶特征点为起点,求得整个模型共 N 层的测地距离等值曲线。当层数逐渐增加时,第一次出现某一层的测地距离等值曲线有 3 个时,就可以确定其中两个周长较小的封闭曲线即为手臂与躯干的分界线。当某一层的测地距离等值曲线有 4 个时,可以确定两个周长较大的封闭曲线即为腿部与躯干的分界线,据此可以区分四肢与躯干部分,如图 2(c)。确定人体四肢的范围后,分别以四肢终端的特征点为起点,按照每层递增 d 来对四肢部分分别计算测地距离等值曲线,这样四肢上的测地距离等值曲线截面可以更好地垂直四肢上的骨骼中心线,截面轮廓更符合医学所指截面,因此当骨骼中心线弯曲很小时可以更准确地利用截面的似圆性判定关节位置。最后将这些相邻等测地线中心连接起来便生成 5 条骨骼中心线,如图 2(d),之后就可以在中心线上确定关节的位置。

2.4 确定关节位置

确定骨骼中心线后,首先用中心线各段夹角极小值的方法确定关节位置,假如夹角大于某一阈值(本文方法取 160°),则再利用等测地曲线似圆率方法,确定关节位置,关节计算结果如图 2(e)。

2.4.1 基于中心夹角极小值算法

决定这点相对整个运动过程的开始时刻。各点开始运动时刻不一定相同。

假设第 i 个等测地距离曲线中心为 C_i , 线段 $C_{i-t} C_i$ 与线段 $C_i C_{i+t}$ 的夹角即为等测地距离曲线中心夹角。 t 的大小根据骨骼中心线所分的等测地距离曲线层数确定,一般层数越多 t 越大。其作用为了减少局部数据波动影响夹角的计算。

针对关节部位存在明显弯曲的情况,如图 4 所示,关节 o 连接骨骼 $b1$ 和 $b2$,则沿中心线,在关节处,等测地距离曲线中心夹角取得局部极小值,图 5 为等测地距离曲线中心夹角与人体对照图,图中关节处(左图的肘部及手腕关节,右图的膝盖和脚踝关节)所对应的中心线夹角很明显的取得了局部极小值,更充分地证明了算法的有效性。

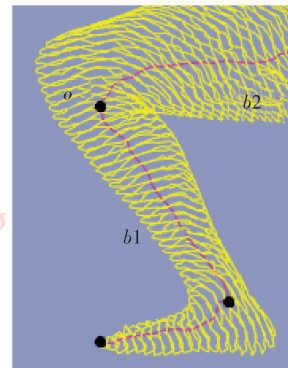


图 4 基于中心夹角极小值算法示意图

Fig. 4 Angle based method

2.4.2 基于等值曲线似圆率算法

基于中心夹角的极小值的方法虽然鲁棒性很高,但是对于关节无明显弯曲的人体模型该方法将不再适用。因此我们再利用于勇等人^[10]提出的基于似圆率的关节中心提取算法,该方法认为由于人体关节附近骨骼末端的影响,截面形状呈现不规则形状;反之,骨骼中部由于肌肉、结缔组织的均匀覆盖而呈现类圆形状,因此通过分析测地距离等值曲线的似圆率确定关节的位置。但由于该算法的曲线截面完全是从头顶开始计算测地距离,因此截面轮廓与医学所指截面存在偏差。本算法改进其算法,四肢上的曲线截面分别从四肢上各特征点开始计算测地距离所得,因此鲁棒性更强。可以通过式(1)求得各测地距离等值曲线中似圆率最小的曲线,曲线中心即为人体关节点。

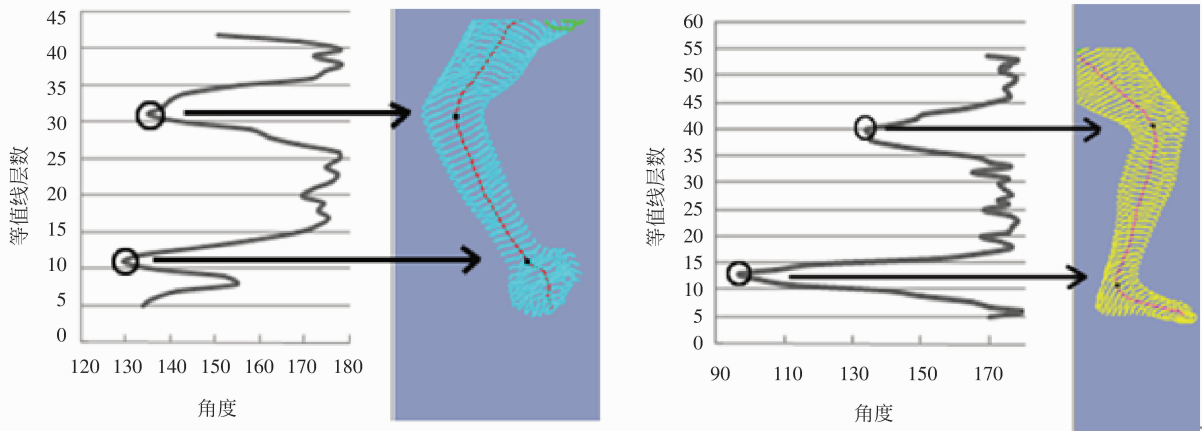


图 5 等测地距离曲线中心夹角与人体对照图

Fig. 5 The angle of geodesic distance isolines and model

$$M_{joint} = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{4\pi s(M_i)}{C^2(M_i)} \right\}$$

$M_i \in$ 测地距离等值曲线集 (1)

3 实验结果

针对特征点提取和识别,以及关节点定位设计了相关实验,所有实验均在一台 P4 3.4 GHz,内存为 2 GB 的 PC 上进行,编程环境为 Windows Visual C++ .net 2005 环境。实验采用的所有人体模型均由三角网格构成,模型面片数为 14 000 ~ 25 000,顶点数在 7 000 ~ 12 500。

3.1 特征点提取和识别

对于特征点提取,选用不同人体模型和同一人体不同姿态模型共 280 个,测试结果发现采用本算法,全部找到了位于手、脚、头部位的 5 个特征点。在特征点识别方面,由于头、手特征点间测地距离明显小于其他任意两个特征点间测地距离,因此,所有被测试的 280 个模型都可以被准确地识别出各特征点部位。但在判断手脚特征点是否同侧时,对于某些姿态,同侧手脚的特征点间的测地距离会大于异侧手脚的特征点间的测地距离,其中 201 个 Dance 模型中有 3 例,71 个 SCAPE 模型中有 15 例。

3.2 关节点定位

为了验证关节点定位算法的有效性,试验将本文方法与普通似圆率法^[10]及周长法^[4]进行比较,对 20 个 Dance 模型和 20 个 SCAPE 模型计算求得受姿

态变化影响较大的手腕关节、肘关节、脚踝关节、膝关节(每类关节各 80 个)的位置与模型关节真实位置进行比较。比较结果如表 1 所示(单位:layer, 1 个 layer 是指一个等测地距离曲线层,本实验将人体模型从头到脚分割为 100 个 layer,1 个 layer 核算成公制单位约为 1.8 cm)。图 6 为应用各算法对上述 4 类关节计算结果与各模型关节真实位置差距对比图。通过表 1 及图 6 可以证明本文方法在手腕,肘部,膝盖 3 类关节的判断中明显优于其他两类方法,只有在脚踝关节的判断上与似圆率法接近。

表 1 各方法计算结果与真实关节的位置差值比较

Tab. 1 The difference between real joint position and each algorithm's results

关节	提取算法	平均值	标准差	最大误差
手腕	本文方法	1.15	1.148	4
	似圆率法	1.988	1.391	5
	周长法	1.975	1.349	6
肘部	本文方法	0.325	0.651 7	3
	似圆率法	1.825	1.394	5
	周长法	3.925	1.508	8
脚踝	本文方法	1.388	0.864 1	4
	似圆率法	1.375	0.817 1	4
	周长法	1.4	0.962 6	4
膝盖	本文方法	0.687 5	0.894 3	5
	似圆率法	2.225	1.483	5
	周长法	2.8	1.247	5

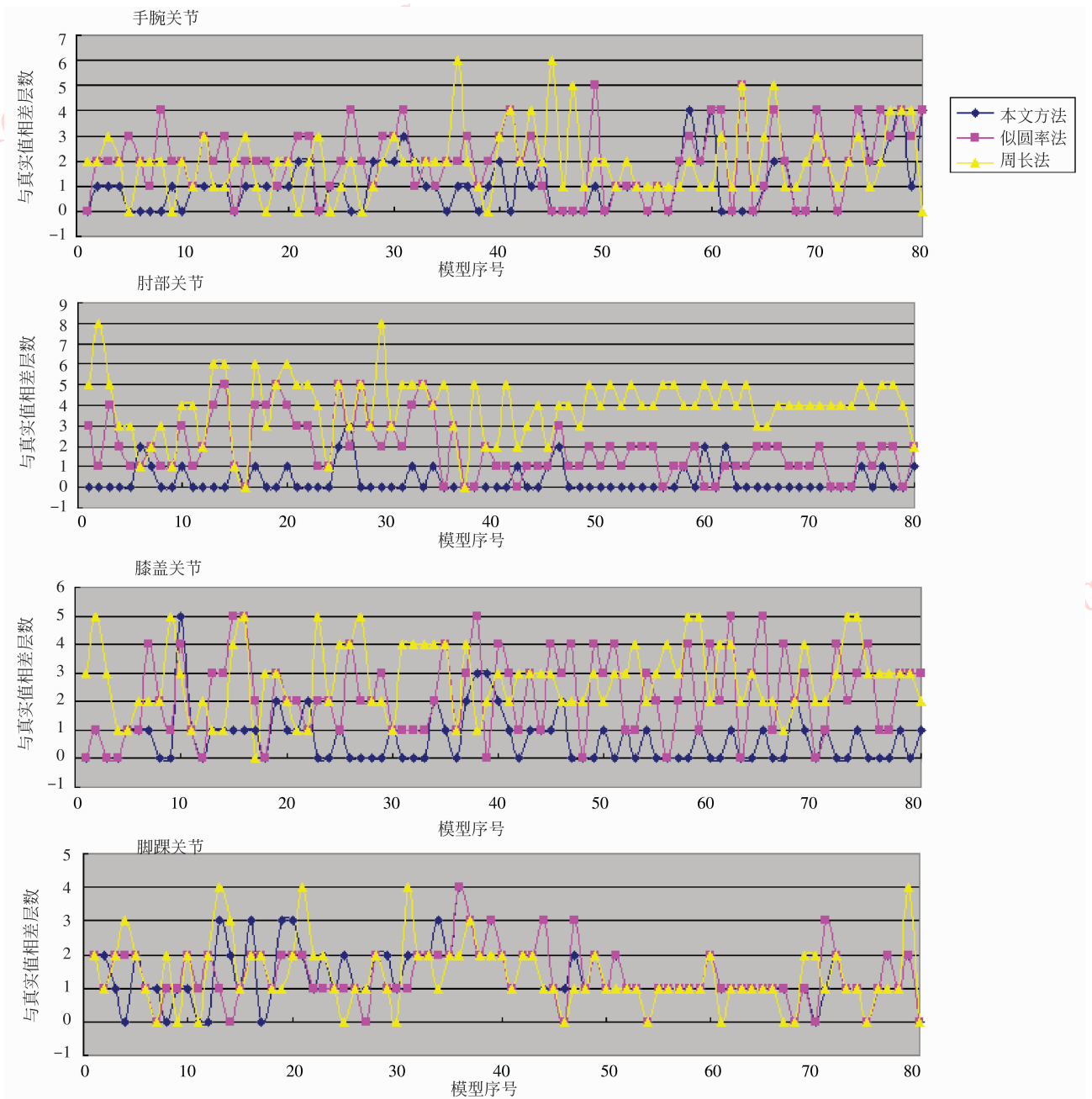


图 6 各算法针对不同关节误差对比图

Fig. 6 The difference between each algorithm's results

4 结 论

针对人体模型的网格表示方式,提出用测地距离度量的、反映人体解剖学和人体运动学特征的骨骼自动提取算法,有效地弥补了针对静态网格表面模型提取骨骼时信息量的不足,具有受姿态变化影响小,便于基于网格表面模型计算的特点。算法对

20 个任意姿态人体模型计算结果(如图 7)。实验证明本文算法能有效提取不同姿态的人体关节和骨骼,具有较强的鲁棒性。本文算法的局限性在于人体生理学特征利用有限,同时对于顶点非完全连通的人体网格模型本方法将会失效。下一阶段将研究如何更充分地利用人体生理学特征来进一步提高算法准确性,以及实现模型之间的顶点自动注册和 3 维人体自动识别。

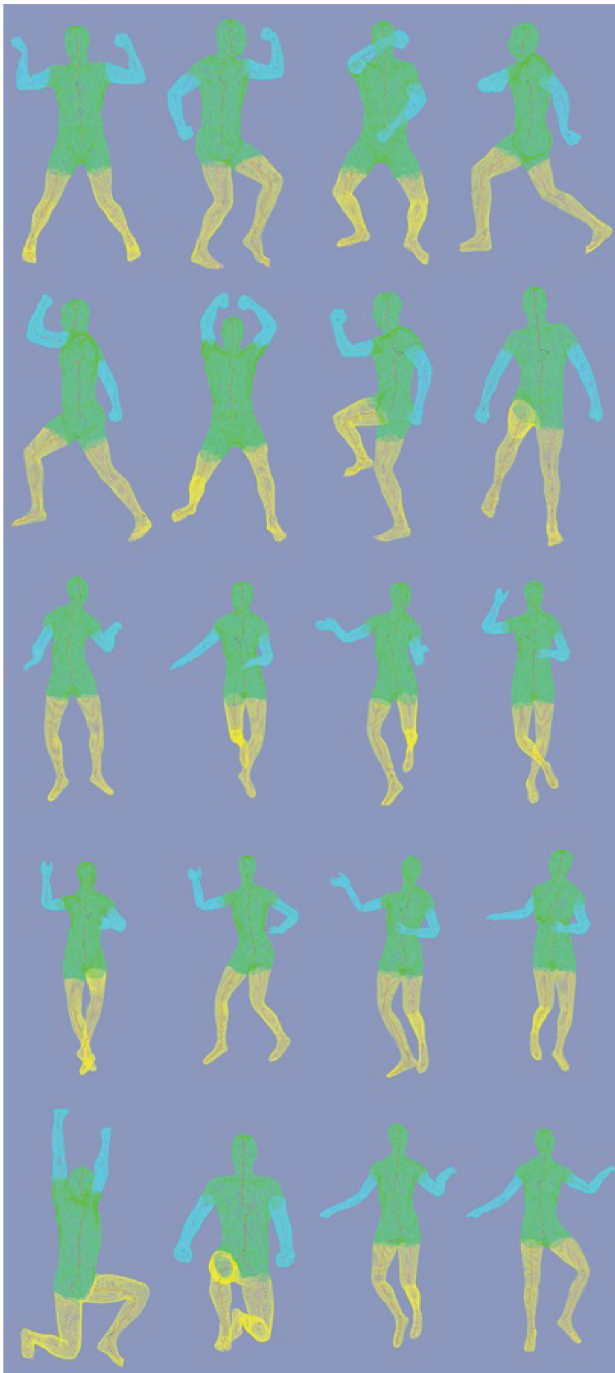


图 7 实验结果图

Fig. 7 Our method results

参考文献 (References)

- [1] Edilson de Aguiar, Christian Theobalt, Sebastian Thrun, et al. Automatic conversion of mesh animations into skeleton-based animations [C] // Proceedings of the EUROGRAPHICS 2008. Computer Graphics Forum. Crete, Greece; European Association for Computer Graphics, 2008; 27(2):389-397.
- [2] Tierny J, Vandeborre J P, Daoudi M. Fast and precise kinematic skeleton extraction of 3D dynamic meshes[C] // Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition NJ USA: IEEE Computer Society, 2008:1-4.
- [3] Nurre J. Locating landmarks on human body scan data [C] // Proceedings of the International Conference of Recent Advances 3D Digital Imaging and Modeling. NJ USA: IEEE Computer Society, 1997:289-295.
- [4] Ju Xiangyang, Werghi Naoufel, Siebert J Paul. Automatic segmentation of 3D human body scans [C] // Proceedings of the Computer Graphics and Imaging. Alberta, Canada: IASTED, 2000:239-244.
- [5] Hu Xiaoyan, Liang Xiaohui, Zhao Qiping. Match the virtual human model and motion data automatically [J]. Journal of Software, 2006, 17(10): 2181-2191. [胡晓雁, 梁晓辉, 赵沁平. 自动匹配虚拟人模型与运动数据 [J]. 软件学报, 2006, 17(10): 2181-2191.]
- [6] Joao Fradinho Oliveira, Zhang Dongliang, Bernhard Spanlang, et al. Animating scanned human models [J]. Journal of WSCG, 2003, 11(2): 362-369.
- [7] Dekker L, Douros I, Buxton B F, et al. Building symbolic information for 3D human body modeling from range data [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. NJ USA: IEEE Computer Society, 1999: 388-397.
- [8] Katz S, Tal A. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 954-961.
- [9] Werghi N, Xiao Yijun, Siebert J P. A functional-based segmentation of human body scans in arbitrary postures [J]. IEEE Transactions on Systems, 2006, 36(1): 153-165.
- [10] Yu Yong, Wang Zhaoqi, Xia Shihong, et al. Pose-independent joint extraction from scanned human body [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(07): 1249-1258. [于勇, 王兆其, 夏时洪, 等. 一种姿态无关的人体模型骨骼提取方法 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(07): 1249-1258.]