人体变形中局部坐标系旋转失真问题

王 成 戴树岭

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 分析了人体变形中选取 3 个基轴构建坐标系所存在的缺陷,提出了一种位置-四元数的方法,解决了曲线骨架驱动的旋转失真现象. 采用四元数球面线形插值和 B 样条四元数插值的方法构建人体变形中曲线骨架的局部坐标系,采用位置-四元数-缩放的方式代替传统的转化矩阵,通过人体表面顶点在该坐标系下的绑定,实现人体皮肤、肌肉的变形. 试验结果显示:该方法有效地消除了局部坐标系的旋转失真现象,适用限制少,易于实现.

关 键 词: 人体变形; 曲线骨架驱动; 局部坐标系; 虚拟现实

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0048-05

Rotation distortion of local coordinate frame in curve skeleton-driven body deformation

Wang Cheng Dai Shuling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An analysis of defects resulting by using three basic orthogonal axes method to construct a local coordinate frame in body deformation was presented. A new approach which was a position-quaternion solution was proposed to improve the defects and rotation distortions of local coordinate frame in curve skeleton-driven body deformation. It took the technique of quaternion spherical linear interpolation and B-spline quaternion interpolation to construct a local coordinate frame, adopt a position-quaternion-scale method to replace traditional transform matrix. It achieved vivid and realistic human skin and muscle deformations by binding body surface vertices to local coordinate frames. The results show that the method effectively eliminates the local coordinate system rotation distortion, fewer restrictions to apply and easy to implement.

Key words: body deformation; curve skeleton-driven; local coordinate frame; virtual reality

曲线骨架驱动技术是构建高质量和逼真人体动画的重要手段和工具,是角色动画中的重要组成部分. 曲线骨骼[1-2],基于样条骨骼[3]是针对线形混合皮肤 LBS(Linear Blend Skinning)[4-9]线形插值缺陷的改进,构建区别于传统刚体直线骨骼的曲线骨骼,使得角色有更灵活、更逼真的变形效果. 运动线[10-11]则一般用于多层人体结构中肌肉层的构造,通过指定其在骨骼上的附着位置和肌肉轮廓及其变形特性就可以定义各种复杂的肌肉体,在基于解剖学的角色构建中广泛应用.

曲线骨架驱动技术主要包含两个方面的内容:①局部坐标系构建;②人体表面顶点在该坐标系下的绑定. 其中,构建局部坐标系是人体变形中一个关键的步骤,它与绑定在其上的人体表面顶点共同构成了人体几何模型,是角色动画、肌肉变形、皮肤变形的基础和必要条件. 构建局部坐标系的方法有很多,文献[12-13]中所用框架是最普通和有用的形式,但它存在两个问题:①曲线拐点处没有局部框架的定义;②空间曲线高转矩区域内框架易产生不必要的旋转. 文献[14]采用了 3

收稿日期: 2010-09-16; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:10; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1510.010
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.010.html
基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA01Z333)
作者简介: 王 成 (1983-),男,湖北荆州人,博士生,www0041607@gmail.com.

个控制点的弧线样条来实现人体皮肤变形,曲线上局部坐标系的基轴分别是:3 个控制点构成平面的法向量、曲线的切向量和由这两个向量叉乘得到的一个向量. 该方法在曲线变形幅度小、角度变化小的情况下可以取得不错效果,但是当曲线弯曲幅度较大时,局部坐标系会出现严重的旋转失真. 另外,当 3 个控制点共线时,无法构成平面,该方法就不能适用了. 文献[15]采用了 3 个控制点的二次贝塞尔曲线来构建肌肉模型,其中采用用户指定向量的方法解决旋转失真问题,但是这需要用户来指定向量,人工方面和可操作性值得考虑,而且它虽然消除了旋转失真,但仍存在一些变形失真.

针对这些问题,本文提出了位置-四元数的局部坐标系构建方法,有效地解决局部坐标系的旋转失真问题,没有人工方面的要求,易于实现,为实现人体变形创造了基础条件.

1　旋转失真现象与原因

一般构建坐标系的方法是构造坐标系的 3 个相互垂直的基轴,通过这 3 个基轴,可以计算得到该坐标系的原点位置、旋转姿态和转化矩阵等信息.

在人体变形中,已有的一些局部坐标系在构建时一般都会选取曲线骨架的切向量作为其中一个基轴,虽然切向量可以确定,而且剩下的两个基轴必然在切向量的垂平面里,但是却不能确定其具体方向,这样导致局部坐标系会绕切向量方向产生一定角度的旋转,从而产生失真现象,如图 1 所示. $f(t)$ 是曲线骨架的插值函数,横线箭头指向是其上某一点的切向量.

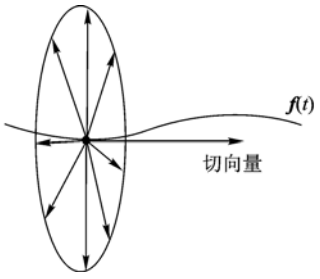


图 1　坐标系旋转失真现象

2　基于位置-四元数方式的坐标系

假设曲线骨架是由 n 个控制点经样条插值而得,每个控制点的坐标和姿态四元数分别为

$$(\boldsymbol{p}_i,\boldsymbol{q}_i)\quad i\in[1,n]$$

插值曲线方程为

$$\boldsymbol{p}(t)=\boldsymbol{f}(t)\quad t\in[0,1]$$

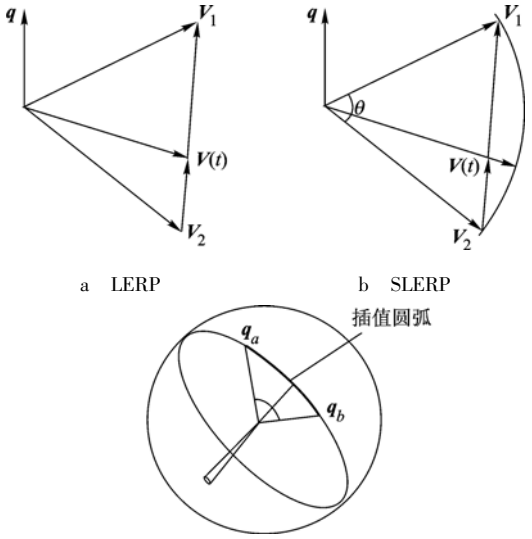
2.1　四元数球面线形插值和 B 样条四元数插值

四元数球面线形插值 QLERP(Quaternion Linear Interpolation)是对四元数进行球面线形插值,其计算公式如下:

$$\boldsymbol{q}_{\mathrm{m}}=\frac{\boldsymbol{q}_a\sin[(1-t)\theta]+\boldsymbol{q}_b\sin(t\theta)}{\sin\theta}$$

其中,$\boldsymbol{q}_a,\boldsymbol{q}_b$ 为两个四元数控制点;$\boldsymbol{q}_m$ 为插值结果;t 为插值参数;θ 为由 $\boldsymbol{q}_a,\boldsymbol{q}_b$ 点积计算得到.

QLERP 不仅继承了线形插值 LERP(Linear Interpolation)插值速度快和球面线形插值 SLERP(Sphere Linear Interpolation)插值结果长度不变的优点,而且在球面圆弧上等角速度地排列插值点,使得插值结果十分光滑,可以很好地满足角色动画对人体变形插值的要求(图 2).



a　LERP　　b　SLERP

c　QLERP

图 2　LERP,SLERP 和 QLERP 示意图

当 QLERP 的四元数控制点多于 2 个时,若将这些控制点分成若干组两个的四元数控制点,每组单独进行 QLERP,会出现邻接点处方向曲线 C^1 不连续的情况.

样条曲线插值可以解决这个问题,为不失一般性,本文采用 B 样条四元数插值 BQC(B-Spline Quaternion Curve)[16],其算法如下:

input:t:插值参数;$N_{i,k}(t)$:k 阶 B 样条基函数;$\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n$:$n$ 个四元数控制点;

output:$\boldsymbol{q}$:插值结果

for $t=0;t<1;t=t+0.01$ do

$B_{i,k}(t)=\sum_{j=i}^{i+k}N_{j,k}(t),i=0,1,2,\cdots,n;$

$i_{\max}=\max\{i\mid t_{i+k-1}\leqslant t\};$

if $i_{\max}<0$ then $i_{\max}=0;\boldsymbol{q}=\boldsymbol{q}_0^{B_{0,k}(t)}$

else $\boldsymbol{q}=\boldsymbol{q}_{maxi}$

for $i=i_{\max}+1;i\leqslant n\&\&t_i<t;i++$ do

$$\boldsymbol{q}=\boldsymbol{q}(\exp(\log(\boldsymbol{q}_{i-1}^{-1}\boldsymbol{q}_i)B_{i,k}(t)))$$

end

综上所述,本文在选择四元数插值方法时,会依据控制点的个数而定,若控制点只有两个,则采用QLERP(记为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}$),若多于两个则采用BQC(记为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{B}}$),为便于描述,在此将本文插值方法称为QI(Quaternion Interpolation,记为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}$),即

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n)=\begin{cases}\boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2) & n=2\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{B}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n) & n>2\end{cases}$$

2.2 构建位置-四元数方式的坐标系

通过插值曲线方程,可以得到曲线骨架上任意一点的坐标:

$$\boldsymbol{p}(t)=\boldsymbol{f}(t)\quad t\in[0,1]$$

通过QI,可计算得到该点处的姿态四元数:

$$\boldsymbol{q}(t)=\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n)$$

那么,就可以构建此处的位置-四元数方式的坐标系:

$$\begin{cases}\boldsymbol{p}(t)=\boldsymbol{f}(t)\\ \boldsymbol{q}(t)=\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n)\end{cases}$$

3 表面顶点在该坐标系下的绑定

构建好局部坐标系后,就可以进入人体变形(包括:皮肤变形、肌肉变形等)的实现过程,该过程主要是将表面顶点映射到局部坐标系下,并随着曲线骨架运动而运动. 本文将采用位置-四元数-缩放(position quaternion scale)取代转化矩阵,实现这一过程.

3.1 映 射

映射过程是一个预处理过程,是在人体构建时的静止状态,将表面顶点映射到局部坐标系下,即求出顶点在局部坐标系下的坐标位置与姿态.

求出表面顶点$\boldsymbol{V}$在轴线上的映射点$\boldsymbol{P}$(图3)和所对应的插值参数t,映射点的满足条件:

$$(\boldsymbol{V}-\boldsymbol{P})\perp\boldsymbol{f}'(t)\quad t\in[0,1]$$

等价于 $$(\boldsymbol{V}-\boldsymbol{f}(t))\boldsymbol{f}'(t)=0$$

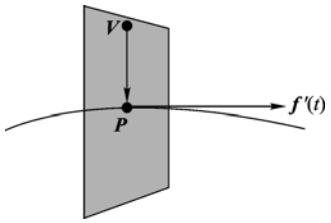


图3 映射示意图

根据该插值参数与式(1)求出映射点的局部坐标系$(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q})$. 假设表面顶点在世界坐标系下坐标为$\boldsymbol{V}_{\mathrm{w}}$,在局部坐标系下的坐标为$\boldsymbol{V}_{\mathrm{l}}$,那么有

$$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{f}(x(t),y(t),z(t))$$

$$\boldsymbol{q}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{I}}(t,\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2,\cdots,\boldsymbol{q}_n)$$

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{w}}=(\boldsymbol{p}+\boldsymbol{q}\boldsymbol{V}_{\mathrm{l}})\boldsymbol{s}$$

其中,$\boldsymbol{s}$为放缩向量(若无放缩则取单位向量);

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{l}}=\boldsymbol{q}^{-1}(\boldsymbol{V}_{\mathrm{w}}\boldsymbol{s}^{-1}-\boldsymbol{p})$$

3.2 绑 定

绑定过程是将映射到局部坐标系下的顶点随着曲线骨架运动而运动,也就是要计算出顶点在运动情况下的世界坐标系下的坐标. 假设局部坐标系运动后新的坐标系表示为$(\boldsymbol{p}',\boldsymbol{q}')$,放缩向量$\boldsymbol{s}'$,那么表面顶点在世界坐标系下坐标为$\boldsymbol{V}'_{\mathrm{w}}$的计算公式如下:

$$\boldsymbol{V}'_{\mathrm{w}}=(\boldsymbol{p}'+\boldsymbol{q}'\boldsymbol{V}_{\mathrm{l}})\boldsymbol{s}'=$$

$$[\boldsymbol{p}'+\boldsymbol{q}'\boldsymbol{q}^{-1}(\boldsymbol{V}_{\mathrm{w}}\boldsymbol{s}^{-1}-\boldsymbol{p})]\boldsymbol{s}'$$

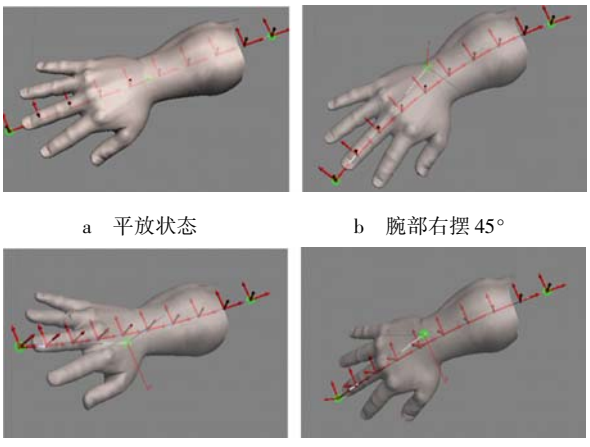
4 实验及分析

4.1 算法在皮肤变形中的应用

本文选取了一段人体右胳膊网格作为对象,顶点数8 391个,采用二阶Bezier曲线作为曲线骨架,右胳膊网格是皮肤层.

算法实现分为两个阶段:初始化阶段和循环运行阶段. 在初始化阶段时,选择右胳膊模型的初始平放状态,按照:控制点设定、生成曲线骨架、构建局部坐标系、网格顶点到局部坐标系下映射和绑定的步骤进行初始化处理. 在循环阶段,当控制点发生位移、姿态变化,重新计算曲线骨架和局部坐标系,重新绑定网格顶点到曲线骨架上.

得到的局部坐标系与胳膊网格变形效果如图4所示,分别是右胳膊模型的初始平放状态,腕部右摆、上抬、下放45°时的状态.

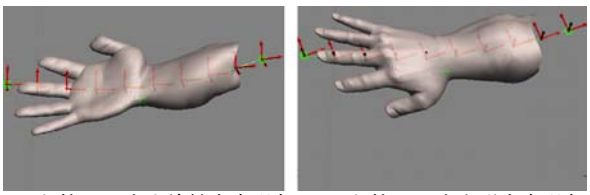


a 平放状态 b 腕部右摆45°

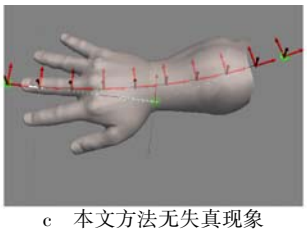
c 腕部上抬45° d 腕部下放45°

图4 几种运动状态下的局部坐标系与变形效果

图 5 是本文方法与文献[14 – 15]方法的比较. 文献[14]由于控制点位置变化,导致 3 个控制点组成的平面法向量也变化,甚至出现向量方向反转,使得坐标系发生旋转失真现象. 文献[15]由于指定了统一的一个向上向量,使得变形体各处的局部坐标系在该向量方向没有姿态变化,导致变形有失真现象. 相比之下,本文方法采用位置-四元数方式代替 3 个基轴构建方式来表征坐标系,消除了旋转失真现象,而且不同于文献[15]指定统一的一个向上向量,本文方法采用 QI 方法对每个坐标系都进行姿态计算,使得变形无失真现象.



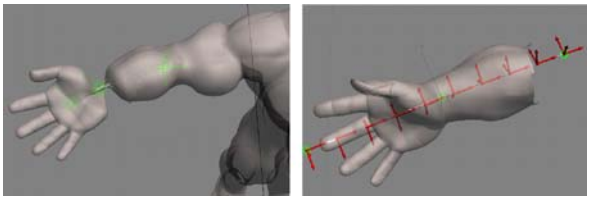
a　文献[14]发生旋转失真现象　b　文献[15]有变形失真现象



c　本文方法无失真现象

图 5　几种算法的坐标系与变形效果的比较(腕关节均左摆 45°)

如图 6 所示,本文采用 QI 这种非线性插值方法有效地消除了 LBS 由于线形插值导致的“糖果纸”现象,而且变形效果光滑,真实感良好.



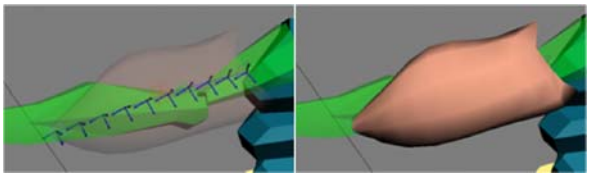
a　LBS 的“糖果纸”现象　　b　本文算法

图 6　算法消除了 LBS 的“糖果纸”现象(腕关节均扭转 150°)

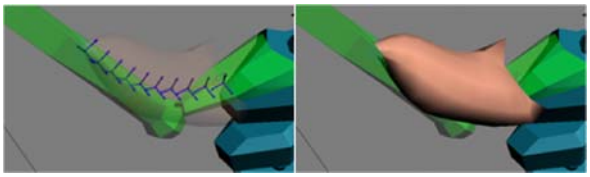
4.2　算法在肌肉变形中的应用

本文选取了一个包含骨骼层、肌肉层和皮肤层的 3 层结构人体模型. 构建肌肉层时,采用 3 个控制点、弧线样条作为运动线构建了肩部肱三头肌模型作为研究对象,算法实现流程与 4.1 相同,得到的局部坐标系与肌肉模型变形效果如图 7 所示.

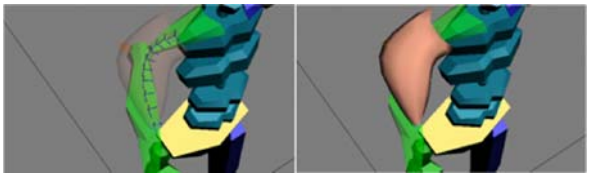
与使用文献[14]、文献[15]的方法相比较,文献[14]由于控制点位置变化,导致控制点组成的平面法向量也变化,使得构成坐标系的 3 个基轴不确定,会出现局部坐标系旋转失真问题(如图 8 所示).



a　肘部扭转 90°

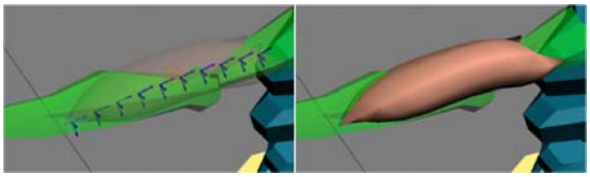


b　肘部上抬 45°

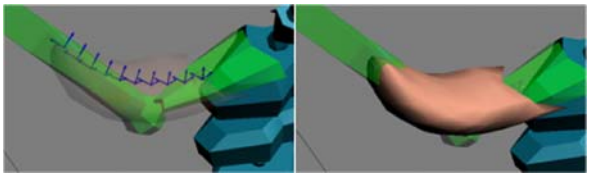


c　肘部前弯 45°

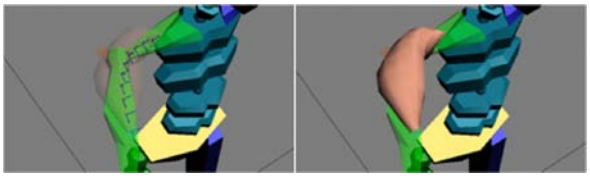
图 7　肱三头肌模型的局部坐标系与变形效果



a　肘部扭转 90°



b　肘部上抬 45°

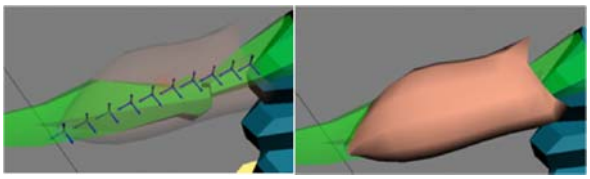


c　肘部前弯 45°

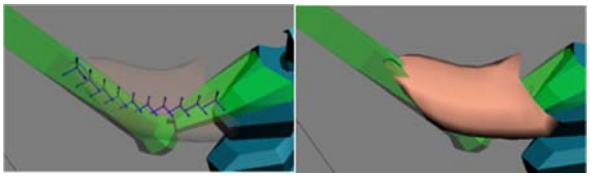
图 8　文献[14]有旋转失真现象

文献[15]的局部坐标系需要用户指定向上向量,而且只指定统一的一个向量,肌肉模型的局部坐标系在该向量方向没有姿态变化,变形效果有些失真(如图 9 所示).

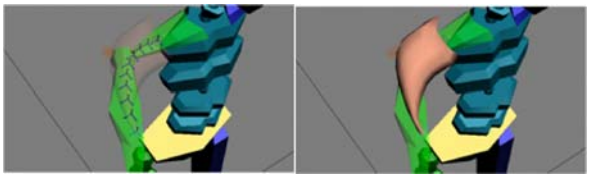
本文采用位置-四元数方式来表征坐标系,采用 QI 方法对每个坐标系都进行姿态计算,很好地消除了局部坐标系旋转失真现象,肌肉模型变形效果的视觉真实感良好.



a 肘部扭转 90°



b 肘部上抬 45°



c 肘部前弯 45°

图 9 文献[15]有变形失真现象

4.3 与其它方法的比较

本文与其它方法的比较如表 1 所示.

表 1 比较方案

曲线骨架驱动方法	局部坐标系旋转失真现象	是否需要用户指定参数向量	算法局限
文献[12]	无	否	有变形失真
文献[14]	有	否	无
文献[15]	无	是	有变形失真
本文	无	否	无

5 结 论

实验结果显示:该方法使用坐标四元数的方式很好的替代了传统 3 个基轴的局部坐标系表征方式,消除了局部坐标系的旋转失真现象,不需要用户指定参数向量,易于实现,为实现基于曲线骨架驱动的人体变形创造了基础条件,可以在二层结构或多层结构的人体可变形模型中作基础构建之用.

参考文献(References)

[1] Yang X S, Somasekharan A, Zhang J J. Curve skeleton skinning for human and creature characters[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2006, 17(3): 281 – 292

[2] Cornea N D, Silver D, Min P. Curve-skeleton applications[C]// IEEE Visualization 2005. Minneapolis: IEEE Press, 2005: 95 – 102

[3] Forstmann S, Ohya J, Artus K G, et al. Deformation styles for spline-based skeletal animation[C]//Proceedings of 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. San Diego: ACM Press, 2007: 621 – 624

[4] Wang X C, Phillips C. Multi-weight enveloping: least-squares approximation techniques for skin animation[C]//In Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Saarbruecken: ACM Press, 2002: 129 – 133

[5] Lewis J P, Cordner M, Fong N. Pose space deformations: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation [C]//In Proceedings of SIGGRAPH2000. New Orleans: ACM Press, 2000: 165 – 172

[6] Kavan L, Zara J. Real-time skin deformation with bones blending [C]//WSCG Short Papers Proceeding, 2003. Plzen Czech Republic: Science Press, 2003: 42 – 48

[7] Yoo T K, Lee W H. Blend shape with quaternions[C]//The 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT'07). Gyeongju: IEEE Press, 2007: 776 – 780

[8] Kavan L, Zara J. Spherical blend skinning: a real-time deformation of articulated models[C]//In 2005 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Washington: ACM Press, 2005: 9 – 16

[9] Kavan L, Collins S, Zara J, et al. Geometric skinning with approximate dual quaternion blending[J]. ACM Transaction on Graphics, 2008, 27(4): 101 – 107

[10] Luciana P N. Anatomic modeling of human bodies using physically-based muscle simulation[D]. Lausanne: EPFL (école Polytechnique Fédérale de Lausanne), 1998

[11] Aubel A. Anatomically-based human body deformations[D]. Lausanne: EPFL(école Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2002

[12] Zuo L, Li J T. Human musculature modeling for real-time deformation[J]. Journal of System Simulation, 2003, 6(4): 41 – 46

[13] Klok F. Two moving coordinate frames for sweeping along a 3d trajectory[J]. Computer Aided Geometric Design, 1986, 5(3): 217 – 229

[14] Forstmann S, Ohya J. Fast skeletal animation by skinned arc-spline based deformation[C]//Eurographics 2006 Short Papers. Vienna: ACM Press, 2006: 51 – 54

[15] Lee K S, Golam A. Simplified muscle dynamics for appealing real-time skin deformation[C]//The 2007 InternationalConference on Computer Graphics and Virtual Reality (CGVR'07). Las Vegas: CSREA Press, 2007: 160 – 167

[16] Kim M J, Kim M S, Sung Y S. A general construction scheme for unit quaternion curves with simple high order derivatives [C]//In Proceedings of SIGGRAPH 1995. Los Angeles: ACM Press, 1995: 369 – 376

(编 辑:刘登敏)