
Research on Automatic Skinning of Articulated Characters Using Extended Position Based Dynamic

Lijuan Chen, Junjun Pan*

School of Computer Science & Engineering, China State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing, China

Email address:

Chenlijuan316@163.com (Lijuan Chen), pan_junjun@buaa.edu.cn (Junjun Pan)

*Corresponding author

To cite this article:

Lijuan Chen, Junjun Pan. Research on Automatic Skinning of Articulated Characters Using Extended Position Based Dynamic. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 135-143. doi: 10.11648/j.sd.20170502.18

Received: March 30, 2017; **Accepted:** April 22, 2017; **Published:** May 4, 2017

Abstract: This paper proposes automatic skinning using extended position based dynamic in character animation, which adds energy conservation constraints based on the easy expandability of the position based dynamics. In the skeletal motion process, the deformation of surface mesh is divided into two stages. First stage: at each frame, the skeleton moves and both the surface and volumetric vertices are deformed by a standard LBS algorithm. Second stage: we use position based dynamics to update both the tetrahedral mesh and surface mesh automatically by solving the constraints. Lastly, self-collision and Laplacian smoothing are used to refine the deformation locally and output the result. In order to verify the feasibility and effectiveness of the mentioned algorithm, this paper experiment with different models and obtain the desired results.

Keywords: Linear Blending Skinning, Position Based Dynamic, Self-Collision Detection, Laplacian Smoothing

角色动画中基于扩展位置动力学蒙皮技术的研究

陈莉娟, 潘俊君*

计算机学院, 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京航空航天大学, 北京, 中国

邮箱

chenlijuan316@163.com (陈莉娟), pan_junjun@buaa.edu.cn (潘俊君)

摘要: 本文提出角色动画中基于扩展位置动力学的蒙皮技术, 根据位置动力学模型易于扩展的特点增加能量保持约束。在骨骼运动过程中, 将皮肤网格的变形分为两个阶段, 先通过传统线性混合蒙皮技术同步实现三角网格和四面体网格的变形, 再利用扩展位置动力学模型更新四面体网格, 进而对三角网格实现二次变形修正其“先天缺陷”, 最后对三角网格的变形结果进行局部的自碰撞检测与处理和拉普拉斯平滑等后处理得到最终的变形结果。针对不同模型得到的实验结果表明, 本文提出的基于扩展位置动力学的线性混合蒙皮技术具有很好的可行性和有效性。

关键词: 线性混合蒙皮, 位置动力学, 自碰撞检测, 拉普拉斯平滑

1. 引言

为了实现基于骨骼的三维角色动画, 动画师需要将模型的表面三角网格和骨架进行绑定, 以骨骼运动驱动表面皮肤网格的变形, 即蒙皮过程。当前, 一些先进的3D软件如Maya、3dmax等促进了角色动画的发展, 但是骨架的人工绑定仍然非常普遍, 这一过程非常考验动画师的经验和耐心, 且非常耗时。

角色动画中一般将绑定过程大致分为以下几部分:

(1) 骨架嵌入: 为给定模型设置一个骨架结构, 通过对骨骼的缩放和关节点位置的调整使二者进行匹配。

(2) 蒙皮过程: 计算表面网格顶点相对关节点的权重并进行优化, 选择某一种蒙皮算法实现骨骼运动对表面网格的驱动, 得到逼真的变形效果。

(3) 设置约束项: 通过一系列约束或逆向动力学(Inverse Kinematics, IK)原理控制骨骼的运动。

当前很多研究尝试实现上述三个过程的自动化或者同一过程在不同模型之间的重用。事实上, 通过一个确定骨骼数和关节点数的骨架结构可以实现上述过程(1)和(3)的自动化[1, 2, 3]。然而, 过程(2)却不容易实现自动化, 因为骨骼的绑定过程非常依赖于模型的形体, 而不同模型的形体差别可能很大。因此, 为了得到变形逼真的动画效果, 网格权重的计算往往需要有经验的动画师做大量重复冗余的工作。这一问题的研究也屡见不鲜[4, 5, 6], 但是都未能完全解决依赖人工干预的问题。

在本文中, 为角色动画提出了一种自动的蒙皮技术。将给定骨架结构嵌入三角网格之后, 首先通过传统的线性混合蒙皮(Linear Blend Skinning, LBS)技术实现网格的变形。为了解决LBS技术在变形中出现的“糖纸扭曲”、关节部位塌陷以及自交叉等“先天缺陷”, 本文通过增加能量保持约束对位置动力学(Position Based Dynamic, PBD)模型进行扩展, 并利用其对三角网格的关节区域进行局部的二次变形。一般而言, LBS的“先天缺陷”往往出现在网格的关节区域, 局部计算将大大减少计算量, 提高算法的效率。本文的主要贡献在于:

第一, 传统的PBD模型用于三维网格的变形, 在体保持方面有一定的效果, 但是针对本文研究中骨骼旋转角度过大所引起的体积损失, 仅靠传统位置动力学模型的拉伸约束、体积保持约束和绑定约束等一般约束不足以解决该问题, 因此本文根据位置动力学模型易于扩展的特点, 为其增加能量保持约束, 进一步提高其体保持能力。

第二, 当骨骼运动时, 首先利用算法简单、计算速度快的传统LBS实现网格变形, 然后通过扩展PBD迭代的解拉伸、体积保持、绑定及能量保持约束对关节区域进行二次变形, 解决LBS的“糖纸扭曲”、关节部位塌陷等问题, 实现了几何蒙皮方法LBS和物理变形方法PBD两者的结合。

第三, 传统LBS技术的变形结果会出现自碰撞导致的交叠问题, 本文通过对关节区域中的点进行自碰撞检测并进行碰撞处理, 避免该问题的出现。此外还对关节区域进行局部的拉普拉斯平滑, 使得最终的变形结果非常逼真。

2. 相关工作

本节将从以下几个方面简单介绍与本文研究内容相关的已有工作: 基于骨骼的蒙皮技术, 网格顶点的权重设置, 位置动力学模型等, 为本文的研究提供技术背景和理论支持。

2.1. 基于骨骼的蒙皮技术

基于骨骼的蒙皮技术主要分为两类: 基于几何(geometry based)的方法和基于实例(example based)的方法。基于几何的方法利用标准的骨架子空间(Skeletal Subspace)实现目标角色的变形[7, 8, 9, 10], 其中Magenat等人[7]提出的LBS技术, 算法简单、计算效率高, 自被提出以来被广泛使用。但是LBS在变形过程中会出现不可避免的缺陷, 如“糖纸扭曲”、关节位置塌陷等, 变形结果体积损失较大。随后Kavan等人[11]给出的基于球面插值思想的对偶四元数蒙皮(Dual Quaternion Skinning, DQS)技术, 其不存在LBS的缺陷, 但是该技术的变形结果存在关节部位凸起的问题, 需要额外的人为修饰[12]。在动画实现过程中, 人工操作一般都很耗时, 所以自动蒙皮技术的研究得到了广泛关注。Jacobson等人[5]提出一种线性混合权重, 即有界双调和权重(Bounded Biharmonic Weights), 通过最小化拉普拉斯能量函数到边界约束来得到权重, 该权重运用于2D或3D的模型都能得到比较实时的变形效果。Vaillant等人[10, 13]利用隐式表面来保持网格的特征, 避免变形过程中自交叉问题的出现。Müller等人[14]在诸如布料、皮肤、头发等模型的变形阶段通过增加基于物理的二次运动过程来增强角色动画的真实性。

基于实例的蒙皮技术也是一种有效的皮肤变形方法, 这类方法通过增加姿势实例[15, 16, 17, 18]或额外的网格权重[19, 20]来消除基于几何的蒙皮技术所存在的缺陷。Xu等人[18]在绑定过程和姿势变形空间增加基于物理的动力学特性, 在任意绑定下都能实现高质量的软组织二次变形效果。Mohr等人[19]提出一种基于实例集的自动皮肤建模方法, 用户可以通过编辑工具实现交互式操作。

2.2. 权重计算方法

皮肤权重的计算也是绑定过程中不可或缺的一项工作。进来, Dionne等人[21]基于测地距离提出了一种自动的权重计算方法, Seo等人[22]则通过表面网格和体积域的插值将基于生物解剖学特性的绑定从一个模型转移到另一个模型。Ju等人[23]基于包围盒提出了一种蒙皮模板, 其允许不同的模型共享和重用绑定与蒙皮过程, 但是这种基于包围盒的蒙皮模板不能满足皮肤变形对细节的要求。

为了使现有模型已经绘制好的顶点权重得到充分的利用, 一些与权重重用相关的新技术应运而生。Allen等人[24]实现了动画属性的设置在模型之间的转移, 每一个关节点的重定位通过网格上的三个标记实现, Dicko等人[25]实现了骨架结构和皮肤顶点权重等属性的重定位。然

而，这些方法都依赖于指定的模板模型，不能针对于用户提供的任意模型对象，具有一定的局限性。最近，Avril等人[26]实现了骨骼与权重数据在具有不同拓扑结构的网格之间的转移，该方法具有很好的鲁棒性。

2.3. 位置动力学模型

位置动力学模型作为一种基于位置的物理变形方法，因为其计算速度快、鲁棒性好等优点而被广泛应用[27, 28]。PBD模型在布料和软组织变形方便的表现，使得其在动画产业和虚拟现实手术模拟器的研究等方面受到越来越多的关注。Clavet等人[29]利用一种基于位置的方法模拟粘滞弹性液体的变形，该方法不是完全基于位置的，所以需要在特定的条件下才能保持比较好的稳定性。Macklin等人[30]针对实时系统中固体、液体和软体组织的仿真变形提出一个统一的PBD实现框架。Rumman等人[31, 32]提出基于PBD的角色动画蒙皮技术，将网格变形分为两个阶段：第一阶段利用标准的LBS变形网格，第二阶段利用PBD优化LBS的变形结果。此外，他们还采用颜色图的方法实现PBD解约束过程的并行处理，大大提高了整个蒙皮算法的计算效率。但是他们的方法没有解决网格在变形过程中可能出现的自交叉问题，导致变形结果出现交叠。本文的研究基于Rumman等人[32]的工作，但通过增加能量保持约束对传统的PBD模型进行扩展，并增加自碰撞检测与处理过程使得变形结果更加逼真。

3. 方法概述

给定输入的表面三角网格和骨架结构，通过本文所研究的基于扩展PBD的蒙皮技术得到变形逼真的动画效果，下面将按如图 1所示的流程介绍实现方法。

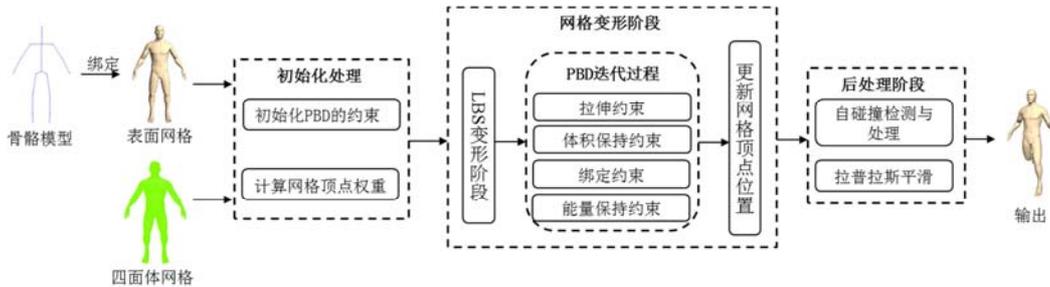


图1 本文基于扩展PBD的蒙皮技术的研究与实现流程图，表面网格经过初始化处理、网络变形阶段和后处理阶段得到最终输出的变形结果。

4. 扩展PBD模型

4.1. PBD模型

PBD模型的主要思想是利用韦尔莱积分法直接对顶点的位置进行操作，其作为一种物理变形方法广泛应用于基于物理的交互式动画中。在本文中利用PBD模型的几何和物理约束修正传统LBS的变形缺陷。

PBD模型以四面体网格作为物理模型，其算法涉及两个基本概念：顶点和约束条件。假设四面体网格中的顶点数目为 N ，网格中每一个顶点包括三个属性：质量 m_i 、位置 \mathbf{x}_i 和速度 \mathbf{v}_i 。模型中约束条件的数目为 M ，在系统运动过

3.1. 初始化处理

本文的输入数据是模型的表面三角网格和骨架结构，采用[4]的方法将骨架嵌入三角网格。本文首先采用Physx Viewer in NVIDIA PhysX SDK[33]为三角网格生成对应的四面体网格，并定义扩展PBD模型的约束条件。此外，在网格变形的第一阶段，利用传统LBS同步实现三角网格和四面体网格的变形，所以需要分别计算两网格的顶点权重，用于蒙皮计算。

3.2. 基于扩展PBD的网格变形阶段

在每一帧动画中，当骨骼运动时，将网格变形过程分为两个阶段：第一阶段利用传统LBS技术同时变形表面三角网格和四面体网格，第二阶段迭代的解扩展PBD模型的拉伸、体积保持、绑定、以及能量保持约束更新四面体网格，再间接更新三角网格的顶点位置。

3.3. 后处理阶段

虽然利用位置动力学模型实现网格的二次变形能避免LBS技术“糖纸扭曲”和关节部位塌陷等问题，但是却不能很好的避免交叠问题的出现。在顶点运动过程中对其进行自碰撞检测，判断其是否与表面网格发生碰撞，如碰撞发生则通过顶点投影进行碰撞处理。传统LBS的变形结果是平滑的，但是经过扩展PBD对其变形结果修正并进行自碰撞检测与处理之后可能出现轻微局部不平滑的情况，本文对变形结果进行局部的拉普拉斯平滑得到最终的变形结果。

程过，通过Gauss-Seidel方法[34]迭代的解所有的约束条件直接更新网格顶点的位置。首先根据每个顶点上一时刻的位置 $\mathbf{x}_i(t - \Delta t)$ 与速度 $\mathbf{v}_i(t - \Delta t)$ 计算预测位置 $\mathbf{p}_i(t)$ ，下面简写为 \mathbf{p}_i 。设 \mathbf{p} 为 $[\mathbf{p}_1^T, \dots, \mathbf{p}_N^T]^T$ ，并令约束条件 C 的输入为 \mathbf{p} ，则每个约束条件可以线性化成：

$$C(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) \approx C(\mathbf{p}) + \nabla_{\mathbf{p}}C(\mathbf{p})\Delta\mathbf{p} = 0 \quad (1)$$

为了保持线动量和角动量，限制 $\Delta\mathbf{p}$ 和 $\nabla_{\mathbf{p}}C(\mathbf{p})$ 的方向一致，这样可以使用一个参数 λ 表示二者的关系：

$$\Delta\mathbf{p} = \lambda\nabla_{\mathbf{p}}C(\mathbf{p}) \quad (2)$$

最终, 每个顶点的位置改变量可以表示为:

$$\Delta \mathbf{p}_i = -\frac{w_i C(\mathbf{p})}{\sum_j w_j |\nabla_{\mathbf{p}_j} C(\mathbf{p})|^2} \nabla_{\mathbf{p}_j} C(\mathbf{p}) \quad (3)$$

其中 $w_i = 1/m_i$ 。

4.2. 传统PBD模型中的约束条件

在本文中使用了四种约束条件: 拉伸约束、体积保持约束、绑定约束和能量保持约束来修正传统LBS变形过程中关节部位出现的塌陷、“糖纸扭曲”等问题, 其中前三种约束常见于一般的PBD模型中[27, 32], 在一定程度上能保持网格在变形过程中的形状和体积不会出现较大的变化。

拉伸约束

拉伸约束定义于四面体网格的每条边上(如图2), 当其两个顶点 \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 的距离在外力作用下发生变化时, 附加在这两个点之间的拉伸约束使这两个点发生位移以达到保持它们之间距离不变的目的, 能够起到保形的作用。拉伸约束的函数表达式定义为:

$$C_{\text{volume}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \frac{1}{6} [(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \times (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3)] \cdot (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_4) - V_0 \quad (5)$$

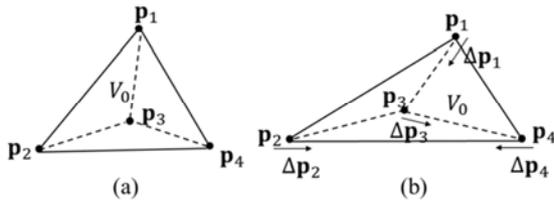


图3 定义于四面体单元 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3\mathbf{p}_4$ 之上的体积保持约束示意图, V_0 为四面体单元的初始体积。

绑定约束

本文中基于扩展PBD蒙皮技术的研究在文献[错误!未定义书签。]的基础上进行, 因此也定义了绑定约束。绑定约束是定义于顶点及其在距离最近骨骼上的投影点之间的一种拉伸约束, 当骨骼移动和关节旋转时, 顶点和其投影点随之更新。绑定约束的函数表达式为:

$$C_{\text{bind}}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') = |\mathbf{p} - \mathbf{p}'| - d \quad (6)$$

其中 \mathbf{p}' 为点 \mathbf{p} 在其最近的骨骼上的投影点, d 为两点之前的静止距离。

4.3. 能量保持约束

目前为止, PBD模型尚未定义约束来考虑模型的材料属性[28], 虽然本文的研究不涉及模型的材料属性, 但当骨骼旋转角度较大时, 体积损失的问题仅靠体积保持约束还不足以得到较大程度的改善, 所以本文基于PBD模型易于扩展的特点提出能量保持约束。这一约束定义于每个四面体单元上(如图4(a)), 通过连接四面体的每个顶点与其重心的虚拟弹簧表示能量, 当四面体发生形变时四个顶点会产生相应的位置改变量以维持弹簧的初始能量值不变(如图4(b))。

$$C_{\text{stretch}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - d \quad (4)$$

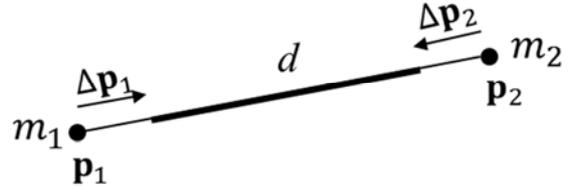


图2 定义于边的两个顶点 \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 之间的拉伸约束示意图, m_1 、 m_2 为顶点的质量, d 为边的初始长度。

体积保持约束

体积保持约束定义于四面体网格的每一个四面体单元(如图3(a)), 当网格发生变形时(如图3(b))用来保持单个四面体单元的体积不变, 间接实现整个网格的体积保持。体积保持约束的函数表达式定义为:

设 \mathbf{p}_0 是四面体单元 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3\mathbf{p}_4$ 的重心, 则有:

$$\mathbf{p}_0 = \sum_{i=1}^4 m_i \mathbf{p}_i / \sum_{i=1}^4 m_i \quad (7)$$

其中 m_i 为顶点的质量。根据胡克定律, 本文将能量保持约束的函数表达式定义为:

$$C_{\text{energy}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 k_i (|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0| - d_i)^2 \quad (8)$$

其中, k_i 是虚拟弹簧 $\mathbf{p}_i\mathbf{p}_0$ 的弹性系数, d_i 是该弹簧的静止长度。对4个顶点求梯度, 得到:

$$\nabla_{\mathbf{p}_i} C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = k_i (|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0| - d_i) \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0|} \quad (9)$$

因此, 可知各顶点的位置该变量为:

$$\Delta \mathbf{p}_i = -\frac{w_i C_{\text{energy}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4)}{\sum_{j=1}^4 w_j |\nabla_{\mathbf{p}_j} C|^2} \nabla_{\mathbf{p}_i} C \quad (10)$$

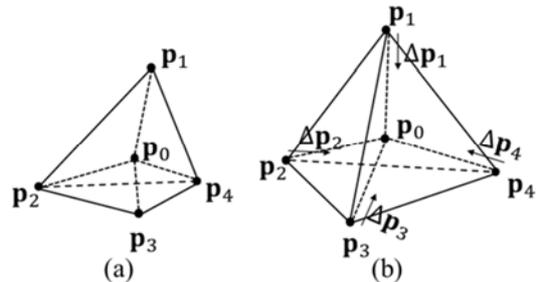


图4 定义于四面体单元 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3\mathbf{p}_4$ 之上的能量保持约束示意图, \mathbf{p}_0 为四面体单元的重心。

虚拟弹簧弹性系数 k_i 的取值会影响能量保持约束的效果, 如图5所示, 在实验过程中扩展PBD仅仅只定义了能量保持约束, 当小臂旋转120度时, 不同的 k 值得到的实

验效果也有所不同。从图中可以看出当 k_i 取0.2时变形效果与传统LBS技术的变形结果差别不大，基本不具备体保持的能力，当 k_i 值取0.5时变形的结果虽然未能达到理想效果，但是仅利用能量保持约束就具有比较好的体保持能力，当 k_i 取值大于0.5时变形效果相对而言变化不大。在本文中假定四根虚拟弹簧的弹性系数均相同，且将 k_i 的取值设置为0.5。

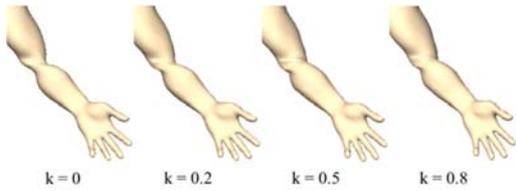


图5 PBD模型只定义能量保持这一约束，不同的弹性系数 k 对应的实验效果不同。

5. 基于扩展PBD的蒙皮技术

5.1. 线性混合蒙皮技术

一般来说，角色动画中运动骨架被定义为骨骼由关节点相连形成的树形结构。当骨架运动时，网格上的顶点 v_i 通过一系列与骨骼相关的矩阵变换得到其新位置 v_i' ，计算公式定义为：

$$v_i' = \sum_{j=1}^b w_{i,j} B_j^{-1} W_j v_i \quad (11)$$

其中 b 表示骨架包含的骨骼块数， $w_{i,j}$ 是第 j 块骨骼对该顶点的影响权重，且 $\sum_{j=1}^b w_{i,j} = 1$ ， $w_{i,j} \geq 0$ 。 B^{-1} 是骨架的绑定矩阵 B 的逆矩阵， W_j 是每块骨骼的世界矩阵。

在LBS中，每一个顶点的运动通常受多块骨骼的影响。为了计算顶点 v_i 的权重 w_i ，本文首先采用Pan等人[3]的方法将网格进行分区，如图6所示，对于每一个关节点通过实验及经验分析确定其关节区域的阈值。针对每一个关节点，网格上与其距离小于阈值的顶点即属于该关节区域（图6(b)中黑色区域），非关节区域的顶点分别属于不同的骨骼所对应的区域。

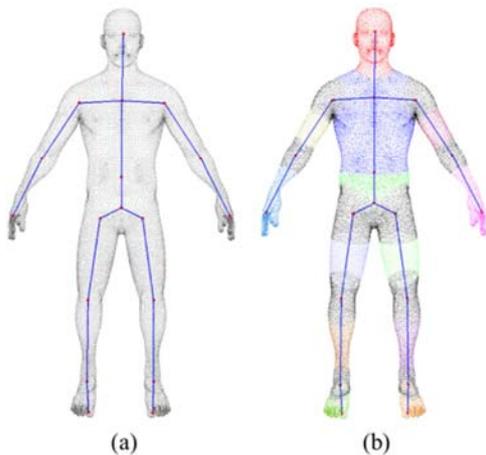


图6 网格分区示意图。(a) 骨骼绑定的结果，(b) 网格分区后不同颜色对应不同区域。

本文作出如下假定：如果顶点属于关节区域，则其运动受三块骨骼影响，否则受两块骨骼影响。然后利用距离法计算各个顶点的权重值：

$$w_{i,j} = \frac{(1/d_{i,j})^4}{\sum_{k=1}^{n_i} (1/d_{i,k})^4} \quad (12)$$

其中 n_i 为影响顶点 v_i 的所有骨骼数， $d_{i,k}$ 为顶点 v_i 与影响它的第 k 块骨骼之间的距离。

5.2. 网格变形阶段

本文将网格变形分为两个阶段：（1）利用传统LBS技术变形三角网格和四面体网格；（2）利用扩展PBD模型变形四面体网格，然后间接实现三角网格的二次变形。最后，本文通过自碰撞检测与处理和拉普拉斯平滑进行后处理进一步优化变形结果。如图7所示，(a)为输入的初始皮肤网格，当左手小臂旋转150度时，通过传统LBS技术变形之后得到的结果如(b)所示，出现了“糖纸扭曲”的现象，体积损失较大，然后通过扩展PBD进行二次变形，最后进行碰撞检测与处理和平滑操作之后得到(c)所示的结果，变形效果光滑逼真，未出现体积损失的情况。

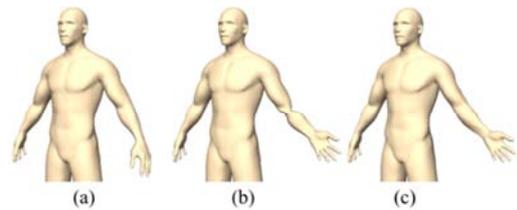


图7 网格变形过程，(a) 网格的初始状态，(b) LBS的变形结果，(c) 最终的输出变形结果，变形逼真。

表1给出了本文中基于扩展PBD的蒙皮算法从输入到结果输出的完整过程：

表1 基于扩展PBD的蒙皮算法。

<p>算法1 基于扩展PBD的蒙皮算法 输入：三角网格和骨架结构 输出：三角网格的变形结果 1: 将骨架嵌入三角网格 2: 用PhysX Viewer生成三角网格对应的四面体网格 3: 针对四面体网格初始化扩展PBD的约束条件 4: 计算网格顶点的权重 5: 利用LBS实现网格的变形 6: loop 迭代次数n 7: 拉伸约束 ($C_{s1}, C_{s2}, \dots, C_{sn}$) 8: 体积保持约束 ($C_{v1}, C_{v2}, \dots, C_{vn}$) 9: 绑定约束 ($C_{b1}, C_{b2}, \dots, C_{bn}$) 10: 能量保持约束 ($C_{e1}, C_{e2}, \dots, C_{en}$) 11: end loop 12: 更新四面体网格顶点的位置 13: 更新三角网格顶点的位置 14: 三角网格的自碰撞检测与处理 15: 拉普拉斯平滑三角网格的关节区域</p>
--

5.3. 自碰撞检测与处理

在基于骨架的角色动画中, 传统LBS技术在变形过程中会出现交叠问题, 扩展PBD也不能很好的解决该问题。交叠问题的实质在于顶点在移动过程中穿透了皮肤网格, 如图 8所示, 顶点 \mathbf{p} 与三角形 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3$ 的关系发生变化。本文基于5.1节中的网格分区结果, 针对关节区域, 将其中的顶点与三角形单元的关系定义为:

$$F = (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \cdot \frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)}{|(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)|} \quad (13)$$

其中 \mathbf{p}_0 为三角形 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3$ 的中心点, 顶点在移动过程中通过检测 F 的符号是否改变来判断自碰撞是否发生。

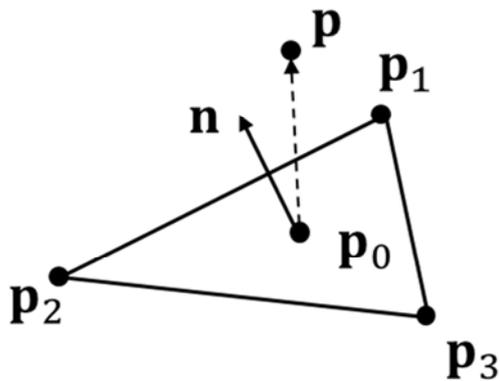


图8 碰撞检测方法示意图, 初始时点 \mathbf{p} 在三角形 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3$ 的某一边, 在网格变形过程中点 \mathbf{p} 移动到 $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3$ 的另一边。

当自碰撞发生时, 本文通过顶点投影, 即将发生碰撞的顶点投影到已知平面来解决自碰撞问题。如图 9所示, 黄色平面为投影平面, 该平面垂直于骨骼所在平面, 且经过旋转关节 \mathbf{j} 和距离其最远的交叉点 \mathbf{p}_0 , 则 \mathbf{p}' 可以通过如下公式计算:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p} - (\mathbf{n} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{j})) \cdot \mathbf{n} \quad (14)$$

其中 \mathbf{n} 为投影平面的单位法向量。

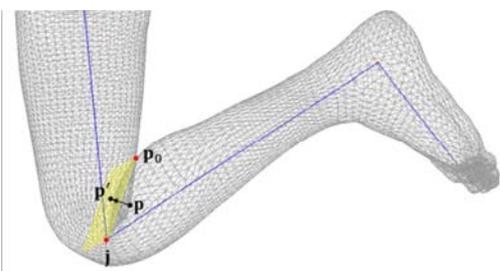


图9 顶点投影示意图, 顶点 \mathbf{p} 在移动过程中穿透皮肤网格进入模型内部, 将其投影到黄色投影平面, 以其投影点 \mathbf{p}' 作为其新位置。

碰撞处理这一过程, 使网格变形结果有效的避免了传统LBS技术导致的交叠问题。图 10所示的是碰撞处理前后的效果对比图, 当小腿向上弯曲角度较大时, 图(a)所示会出现表面网格交叠的情况(红色圆圈中), 变形很不逼真, 而图(b)中通过碰撞检测与处理有效的解决该问题。

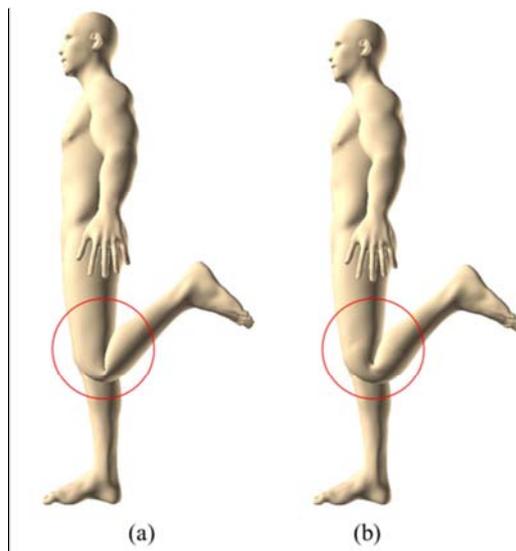


图10 当小腿弯曲时, 自碰撞检测与处理前后得到的变形效果图。(a)自碰撞处理前的变形效果, (b)自碰撞处理后的变形效果。

5.4. 拉普拉斯平滑

传统LBS技术的变形结果是平滑的, 但是经过扩展PBD模型对其变形结果进行修正之后可能出现局部不平滑的情况, 特别是在关节区域(如图 11所示的膝关节处)。本文在后处理阶段采用拉普拉斯平滑(Laplacian Smoothing)对表面网格变形结果的关节区域进行平滑, 针对关节区域中的顶点 \mathbf{p}_i , 其平滑过程通过如下公式实现:

$$\mathbf{p}_i = (1 - k)\mathbf{p}_i + k\tilde{\mathbf{p}}_i \quad (15)$$

其中 k 为平滑强度, 它的值通过实验确定, $\tilde{\mathbf{p}}_i$ 为顶点 \mathbf{p}_i 环形邻域的中心点。

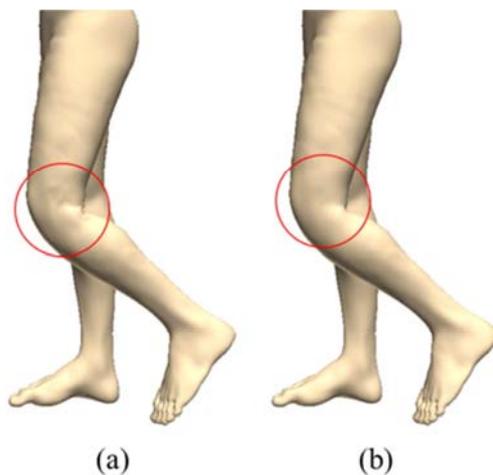


图11 拉普拉斯平滑前后效果对比图。(a)为平滑前, (b)为平滑后。

6. 实验结果

本文的算法实现在个人计算机上完成, 电脑配置: GeForceGT 630、Inter Core i7-4790、8G内存。为了验

证本文所实现的蒙皮技术的可行性与有效性，本文进行了两类实验。

在第一类实验中，先将本文的蒙皮技术与传统的LBS和DQS进行对比，如图 12所示，(a)为LBS的变形效果，出现了“糖纸扭曲”和关节部位塌陷的问题，体积损失的问题比较严重，变形不够逼真；(b)为DQS的变形效果，虽然不存在体积损失，但会出现关节部位膨胀凸起的问题；(c)为本文的蒙皮方法得到的实验结果，不存在上述二者的问题，变形比较逼真。

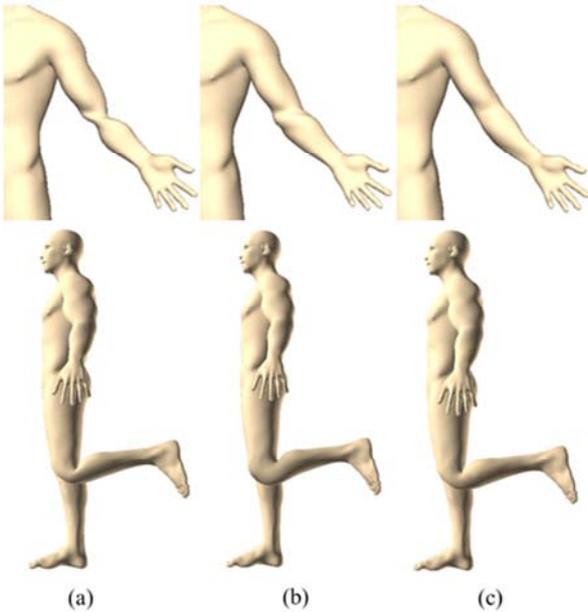


图12 本文的蒙皮方法与LBS和DQS的对比效果图，(a)为LBS的变形效果，(b)为DQS的变形效果，(c)为本文的方法。

此外，传统LBS技术的变形结果会出现交叠的问题，Rumman等人[32]给出的方法虽然也是用到了PBD模型但是没有解决该问题，本文也与他们的方法进行了对比。如图 13所示，同一模型在相同姿势变形和渲染条件下，(a)图为用Rumman等人[32]的方法得到的变形结果，没有经过碰撞处理，在大腿根部(红色圈中)有比较明显的“褶皱”，(b)图为本文的方法得到的变形结果，经过碰撞处理之后没有出现自交叉的问题。

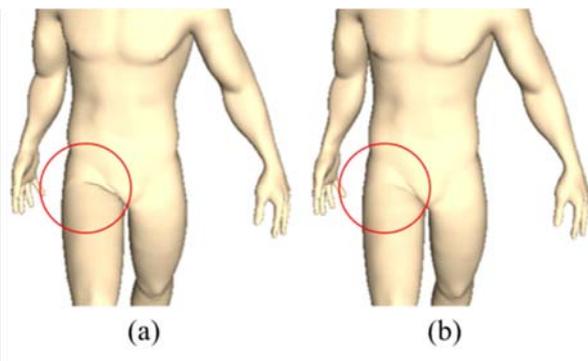


图13 本文的蒙皮方法与方法[32]的对比效果图，(a)为方法[32]的变形结果，(b)为本文方法的变形结果，红色圆圈所标示的部分变形光滑。

在第二类实验中，分别针对四种不同的模型：人体、狗、玩偶和穿山甲，进行蒙皮算法的实验，表 2是模型的三角网格顶点数和四面体网格的四面体单元数，以及分别利用LBS、DQS和本文的方法得到一帧动画效果所需的时间。

表2 不同方法时间效率的比较。

模型	三角网格 顶点数	四面体网格 四面体数	LBS (ms)	DQS (ms)	本文方法 (ms)
人体	24461	51110	5.0	15.6	22.4
玩偶	13336	25768	2.3	10.5	16.5
穿山甲	15116	23916	2.8	11.5	17.7
狗	18114	30790	3.4	11.7	19.0

由表中数据可知，虽然PBD模型相对其它物理变形方法速度很快，但其速度与LBS和DQS相比仍然较慢，使得本文所给出的蒙皮技术虽然在效果上比较理想，但是效率相对较低。

图14、图 15、图 16、图 17分别给出了四种模型的实验结果。从图中可以看出，本文的方法不仅适用于人与两足动物，也适用于狗等四足动物，而且即使是如大幅度甩臂、大角度抬腿等比较夸张的姿势，在关节处的变形也没有出现失真的现象，仍然得到了比较平滑且逼真自然的动画效果，符合预期的设想。

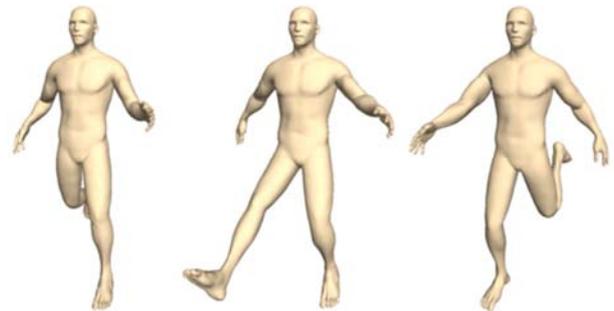


图14 人体模型变形效果图。



图15 狗模型变形效果图。

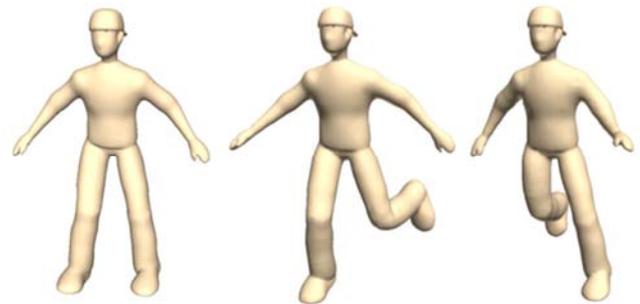


图16 玩偶模型变形效果图。



图17 穿山甲模型变形效果图。

7. 结论

本文提出了一种角色动画的自动蒙皮技术, 将蒙皮过程分为两个阶段, 首先利用传统的LBS实现网格的变形, 然后通过增加能量约束得到扩展PBD模型并用此对网格实现二次变形, 扩展PBD模型能很好的解决传统LBS关节部位塌陷、“糖纸扭曲”等问题。在后处理阶段, 本文先对PBD的变形结果进行了自碰撞检测与处理, 避免了传统LBS在变形过程中出现的交叠问题, 然后对皮肤网格的关节区域进行局部的拉普拉斯平滑, 得到最终变形逼真的动画效果。在以后的工作中, 将进一步提高本文蒙皮技术的计算速度。蒙皮过程的时间消耗主要在于物理变形方法——扩展PBD的约束求解, 所以后续我们希望利用CUDA并行处理这一过程, 减少其对时间的需求。此外, 虽然扩展PBD模型用于角色动画能得到逼真的动画效果, 但是当骨骼旋转角度过大时, 仍然可能出现不能通过拉普拉斯平滑解决的局部不平滑现象, 需要对不平滑区域顶点的权重进行人为矫饰, 我们希望寻找一种自动的方法能实现不同模型之间权重数据的重用, 尽量避免人工干预。

参考文献

- [1] Hiebert B, Dave J, Kim T. Y, et al. The Chronicles of Narnia: the lion, the crowds and rhythm and hues Author video presentations are available from the citation page, ACM SIGGRAPH, 2006: 1.
- [2] Smith J, White J. BlockParty: modular rigging encoded in a geometric volume, Acm Transactions on Graphics, 2006: 115.
- [3] Pan J, Yang X, Xie X, et al. Automatic rigging for animation characters with 3D silhouette, Computer Animation and Virtual Worlds, 2009, 20(2-3): 121-131.
- [4] Baran I, Popović J. Automatic rigging and animation of 3D characters, Acm Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 72.
- [5] Jacobson A, Baran I, Popović J, et al. Bounded biharmonic weights for real-time deformation, Acm Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 76-79.
- [6] Dionne O, Lasa M. D. Geodesic voxel binding for production character meshes, ACM Siggraph/eurographics Symposium on Computer Animation, 2013:173-180.
- [7] Magnat-Thalmann N, Laperrière R, et al. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping, Proceedings Graphics Interface, 1988: 26-33.
- [8] Forstmann S, Ohya J. Fast Skeletal Animation by skinned Arc-Spline based Deformation, Proc Eurographics Short, 2006.
- [9] Mukai T, Kuriyama S. Efficient dynamic skinning with low-rank helper bone controllers, Acm Transactions on Graphics, 2016:35(4).
- [10] Vaillant R, Barthe L, Guennebaud G, et al. Implicit Skinning: Real-Time Skin Deformation with Contact Modeling, Acm Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 96-96.
- [11] Kavan L, Collins S, Zăra J, et al. Geometric skinning with approximate dual quaternion blending, Acm Transactions on Graphics, 2008, 27(4): 995-999.
- [12] Kim Y. B, Han J. H. Bulging-free dual quaternion skinning, Computer Animation and Virtual Worlds, 2014, 25(3-4): 321-329.
- [13] Vaillant R, Guennebaud G, Barthe L, et al. Robust isosurface tracking for interactive character skinning[J]. Acm Transactions on Graphics, 2014, 33(6):189.
- [14] Müller M, Chentanez N. Adding Physics to Animated Characters with Oriented Particles, The Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulations, Vriphys 2011, Lyon, France, DBLP, 2011: 83-91.
- [15] James D. L, Twigg C. D. Skinning mesh animations[J], Acm Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 399-407.
- [16] Park S. I, Hodgins J. K. Data-driven modeling of skin and muscle deformation[J], Acm Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 15-19.
- [17] Lewis J. P, Cordner M, Fong N. Pose space deformation: a uni_ed approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation, Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2000: 165-172.
- [18] Xu H, Barbič J. Pose-space subspace dynamics[J], Acm Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-14.
- [19] Mohr A, Gleicher M. Building efficient, accurate character skins from examples[J], Acm Transactions on Graphics, 2003, 21(3): 562-568.
- [20] Merry B, Marais P, Gain J. Animation space: A truly linear framework for character animation, Acm Transactions on Graphics, 2006, 25(4): 1400-1423.
- [21] Dionne O, Lasa M. D. Geodesic voxel binding for production character meshes, ACM Siggraph/eurographics Symposium on Computer Animation, 2013: 173-180.

- [22] Seo J, Seol Y, Wi D, et al. Rigging transfer, *Computer Animation and Virtual Worlds*[J], 2010, 21(3-4): 375-386.
- [23] Ju T, Zhou Q. Y, Panne M, et al. Reusable skinning templates using cage-based deformations[J], *Acm Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 32-39.
- [24] Allen B, Curless B, Popović J, et al. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans[J], *Acm Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):587-594.
- [25] Ali-Hamadi D, Liu T, Gilles B, et al. Anatomy transfer, *Acm Transactions on Graphics*, 2013, 32(6):188.
- [26] Avril Q, Ribet S, Ghafourzadeh D, et al. Animation Setup Transfer for 3D Characters, *Computer Graphics Forum*, 2016: 115-126.
- [27] Müller M, Heidelberger B, Hennix M, et al. Position based dynamics, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, 18(2): 109-118.
- [28] Bender J, Müller M, Otaduy M. A, et al. A Survey on Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics, *Computer Graphics Forum*, 2014, 33(6): 228-251.
- [29] Clavet S, Beaudoin P, Poulin P. Particle-based Viscoelastic Fluid Simulation[C]. *ACM Siggraph/eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA 2005, Los Angeles, Ca, Usa, July. 2005:219-228.
- [30] Macklin M, Ller M, Chentanez N, et al. Unified particle physics for real-time applications, *Acm Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 1-12.
- [31] Rumman N. A, Fratarcangeli M. Position Based Skinning of Skeleton-driven Deformable Characters[C]. *Scg*. 2014:83-90.
- [32] Rumman N. A, Fratarcangeli M. Position Based Skinning for Soft Articulated Characters[J]. *Computer Graphics Forum*, 2015, 34(6):240-250.
- [33] PhysX-Nvidia, <http://physxinfo.com/wiki/>.
- [34] Kincaid D, Cheney W. 数值分析 (原书第3版) [M]. 王国荣, 俞耀明, 徐兆亮. 北京: 机械工业出版社, 2005: 170-172.