

虚拟膝关节手术中基于骨架的实时形变方法

尚洁¹, 熊岳山², 徐兴华¹, 康勇¹

(1. 海军工程大学计算机工程系, 武汉 430033; 2. 国防科技大学计算机学院, 长沙 410073)

摘要: 针对带有骨架的3D模型的大范围形变问题, 提出一种改进的梯度域方法, 通过在容易引起体积失真的部位(如关节)加入虚拟节点构建体图, 采用体微分坐标实现保持体积的形变。通过修改能量函数中的权值, 实现表面材料相关的形变。实验表明, 该方法能够满足虚拟膝关节手术的实时性和真实感要求。

关键词: 虚拟膝关节手术; 大范围形变; 梯度域方法; 有关节的形变; 表面材料相关

Skeleton-based Real-time Deformation Method in Virtual Knee Joint Surgery

SHANG Jie¹, XIONG Yue-shan², XU Xing-hua¹, KANG Yong¹

(1. Department of Computer Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033;

2. School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

【Abstract】 According to the gradient domain method with two features, this paper propose an improved method for large deformation of 3D model with skeleton. It adds a virtual node near the model part that may introduce most of the volume degradation during deformation, such as joint part in the articulated deformation, and adjusts the weights in the energy function to make the deformation material-aware. Experiment shows the effectiveness and efficiency of the method in virtual knee joint surgery.

【Key words】 virtual knee joint surgery; large deformation; gradient domain method; articulated deformation; material-aware

虚拟手术是将医学手术在计算机上虚拟重现的过程, 基于虚拟现实技术的手术仿真系统具有很好的应用前景。虚拟手术中经常要模拟人体的形变, 如手术器械引起的局部形变、肢体运动引起的较大范围的形变。模拟表面局部的形变时, 常常采用计算量较小的线弹性形变模型对某个小范围区域进行处理; 而模拟大范围形变时, 为避免线弹性模型的失真, 一般采用开销较大的非线性方法。在模型的大范围形变过程中, 大部分顶点都要参与计算, 因此, 与小范围形变相比, 大范围形变具有更高的计算复杂度, 可能影响系统的实时性。而实时性好的方法其形变效果往往不够逼真。

1 相关工作

人体表面网格模型的大范围形变早先是跟随骨架运动的刚性形变。这种方法效率非常高, 但效果很不逼真。随后, 文献[1]引入了依赖于关节的局部变形算子的概念, 将网格上的点加权地连续映射到相关的各段骨架上, 这种方法速度较快, 形变结果具有一定的表面连续性, 但无法保持表面细节, 且适用性不好。骨架驱动形变又称为骨架子空间形变, 是一种基于骨架的加权插值方法^[2-4]。其中, 点的新位置可以表示为各关节变换的加权组合。这种方法速度快、形变结果较好, 但操作者的工作量较大, 有时候也会出现失真。

许多网格编辑方法, 比如拉普拉斯表面编辑方法^[5], 在恰当地选择控制点的情况下, 能使模型进行较好的形变。但 these 方法都依靠控制点操纵表面网格, 当这种操纵关系不符合物理规律时容易产生失真。

本文提出了一种针对膝关节表面模型的大范围实时形变方法, 通过对网格的表面微分坐标进行处理实现形变, 其中

添加了对关节部位的位置约束以及模型表面硬度的描述。本方法既克服了以往方法应用在膝关节表面模型上所带来的失真问题, 又具有较高的运算效率, 能够同时满足虚拟手术过程中对逼真性和实时性的要求。

2 大范围形变的方法

本方法处理的对象是表面三角面片网格, 可以用二元组 (V, E) 表示, 其中, V 是网格上所有顶点的三维笛卡尔坐标的集合; E 是网格上所有顶点之间的连接关系。

2.1 拉普拉斯表面形变

文献[6]中提到, 由拉普拉斯算子取得形变结果应该满足形变能量最小化的要求:

$$\tilde{x} = \arg \min_x \left(\|Lx - \delta^{(s)}\|^2 + \sum_{j \in C} \omega^2 |x_j - c_j|^2 \right) \quad (1)$$

其中, L 是拉普拉斯算子; δ_i 是微分坐标; $N(i) = \{j | (i, j) \in E\}$ 是第 i 个顶点的一环邻域; $d_i = |N(i)|$ 是第 i 个顶点一环邻域内点的个数。

本方法采用的框架与拉普拉斯表面编辑方法^[5]相似, 也是先获得每个顶点处的表面微分坐标, 然后根据指定的控制点的位移对这些微分坐标进行某种计算, 得到形变后的微分

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60371036, 60773022); 国家“863”计划基金资助项目(2007AA01Z313); 北京市自然科学基金资助项目(4062034)

作者简介: 尚洁(1980-), 女, 助教, 主研方向: 虚拟现实; 熊岳山, 教授、博士; 徐兴华、康勇, 助教、硕士

收稿日期: 2008-07-04 **E-mail:** xinghuaxv@sina.com

坐标，最后根据新的微分坐标还原出形变后的网格。

文献[6]通过求解如下线性系统得到网格还原结果：

$$\left(\begin{array}{c|c} L & \\ \hline \omega \cdot \mathbf{I}_{m \times m} & 0 \end{array} \right) x = \left(\begin{array}{c} \delta'(x) \\ \omega \cdot c_{1,m} \end{array} \right) \quad (2)$$

其中， L 是拉普拉斯算子； ω 是控制点的权重； $\delta'(x)$ 是微分坐标； $\mathbf{I}_{m \times m}$ 是 m 阶单位矩阵； $c_{1,m}$ 是各控制点的坐标。

为保证形变的旋转不变性，本文采用文献[7]的调和场方法对微分坐标进行旋转。式(2)可变化为如下形式：

$$\left(\begin{array}{c|c} L & \\ \hline \omega \cdot \mathbf{I}_{m \times m} & 0 \end{array} \right) x = \left(\begin{array}{c} T \cdot \mathbf{I}_{m \times m} \cdot \delta(x) \\ \omega \cdot c_{1,m} \end{array} \right) \quad (3)$$

这种调和场的方法能够更加均匀地按照网格形状对每个点的表面微分坐标进行旋转变换的插值。

本文按照文献[5]的方法对计算过程进行加速：超定方程组(式(3))的系数矩阵是稀疏的，通过将方程组标准化后再对系数矩阵进行 Cholesky 分解，转化为 2 个三角方程组的求解。这使得形变的效率大大提高，再配合 TAUCS 运算库，更容易达到实时的效果。

2.2 基于中心控制点的微分坐标

文献[6]中的微分坐标是顶点位置与其一环邻域重心位置的差值，即：

$$\delta_i = (\delta_i^{(x)}, \delta_i^{(y)}, \delta_i^{(z)}) = v_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N(i)} v_j \quad (4)$$

其中， δ_i 是微分坐标； $N(i) = \{j | (i, j) \in E\}$ 是第 i 个顶点的一环邻域； $d_i = |N(i)|$ 是第 i 个顶点一环邻域内点的个数。

这种微分坐标仅包含了网格顶点的局部信息，没有包含该点的全局坐标信息，当顶点距离操纵位置的控制点较远时，它的位置由其他顶点传递计算得到，常常会产生失真。

为解决形变后模型与骨架偏移过大的问题，本文采用了一种含有中心控制点位置信息的微分坐标，既可以描述顶点的局部几何形状，又包含了顶点相对于中心控制点的位置信息。可以选取位于骨架中轴线上的交点 O (即旋转的中心点) 为中心控制点，其附近限定范围内的所有顶点组成点集 P ， P 中所有顶点的微分坐标都与 O 相关联。这种微分坐标的表达式为

$$\delta_i = (\delta_i^{(x)}, \delta_i^{(y)}, \delta_i^{(z)}) = v_i - \frac{1}{d_i + 1} (\sum_{j \in N(i)} v_j + o) \quad (5)$$

其中， o 是 O 的笛卡儿坐标。如图 1 所示，这种微分坐标相当于在获得网格表面微分坐标时将 O 点也当作 P 中每个点的邻接点，这样求得的微分坐标不仅含有局部细节信息，而且含有整体的布局信息。在图 1 中，黑色的线条表示点 i 处的微分坐标向量。

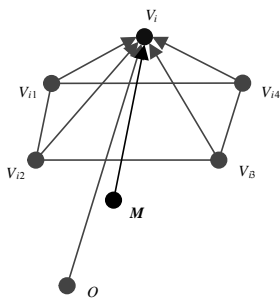


图 1 基于中心控制点的微分坐标示意图

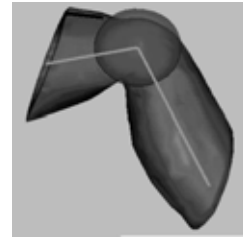
求这种微分坐标的具体方法是以 O 点为控制点，将其加入网格模型中的点集 V 中，即 $V' = \{v | v \in V \text{ 或 } v = O\}$ ，向边集

E 中添加新的边，使得

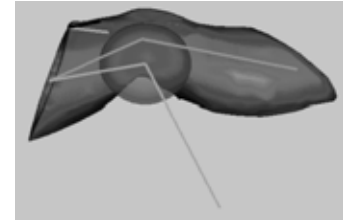
$$E' = \{e | e \in E \text{ 或 } e = (O, v) \text{ 或 } e = (v, O), (v \in V)\}$$

同时将 O 点作为形变控制点之一， O 点的位置由形变后骨架的交点确定，向超定方程组中添加一条关于点 O 的方程，把它的坐标赋值为初始坐标，该方程的系数和等式右边同时乘以较大的权值。

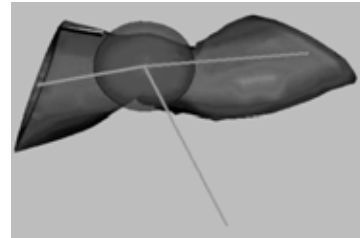
图 2(b)表示了未经优化的形变结果，相对而言，基于中心控制点的微分坐标能够很好地保持形变后模型关节附近部分的位置，如图 2(c)所示。可是从也可以明显看出，在膝关节与小腿的衔接处有较大的失真。这是由于在关节附近采用基于中心控制点的微分坐标，而其他部分的点采用未基于中心控制点的微分坐标，因此在还原网格时，表面微分坐标的变化很不均匀。



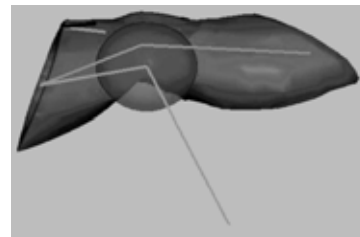
(a)原模型



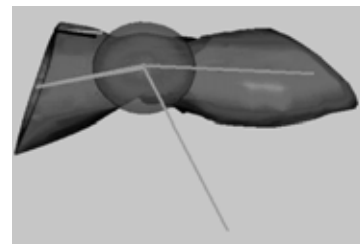
(b)未优化的形变结果



(c)添加中心控制点的形变结果



(d)添加表面材质信息的形变结果



(e)同时添加中心控制点和表面材质信息的形变结果

图 2 改进的线性微分坐标方法的形变效果

2.3 基于表面材质的形状修正

为解决图 2(c)所示的无法正确还原形状的问题,本文对式(3)中每个顶点所对应的方程系数和方程右边同时进行了加权,权重大的方程,其对应顶点的微分坐标变化较小。

$$\hat{L} = LW, \hat{I}_{m \times n} = [I_{m \times n} | 0]W \quad (6)$$

其中, $W = \begin{bmatrix} \varpi_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \varpi_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \varpi_n \end{bmatrix}$ 是记录每个点权重的对角矩阵。

于是可以得到形变方程:

$$\left(\frac{\hat{L}}{\varpi \cdot I_{m \times n} | 0} \right) x = \begin{pmatrix} T \cdot \hat{I}_{n \times n} \cdot \delta(x) \\ \varpi \cdot c_{1m} \end{pmatrix} \quad (7)$$

在离关节较远处,点的坐标更多地受骨架运动的影响,更多地体现出刚性特征,因此,可以把这部分点所在的方程系数与较大的权重相乘。

在离关节较近处,点的坐标应该更多地体现出关节部位形变的特点,即柔性特征,因此,它们所在方程的系数权重应该较小。

在具有基于中心控制点微分坐标的顶点与具有未基于中心控制点微分坐标的顶点之间的衔接处,可以加大表面材质的硬度,从而保证微分坐标的均匀变化。

在形变过程中同时添加骨架连接处控制点和表面材质信息,将得到较好的形变效果,如图 2(e)所示。但如果仅仅添加表面材质信息,则无法保证形变结果符合骨架的正确位置,如图 2(d)所示。

3 实验结果

对于带有骨骼的膝关节原始模型如图 3 所示,当采用普通梯度域方法进行变形时,变形结果如图 4 所示,模型的表面与骨骼产生了相交的情况,明显失真。当采用基于中心控制点的微分坐标,并且添加表面材质信息时,变形结果如图 5 所示,具有很好的真实感。

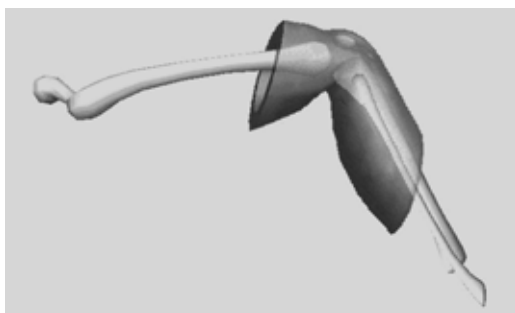


图 3 带有骨骼的膝关节模型

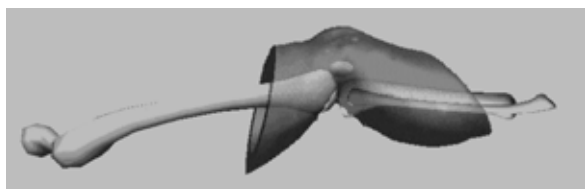


图 4 普通方法的形变效果

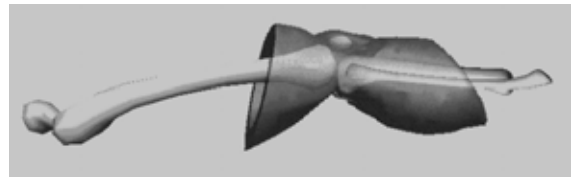


图 5 本文方法的形变效果

在主频 1.6 GHz、2 GB 内存的机器上,对具有 2 000 个点的膝关节模型进行形变,刷新率可达到每秒 15 帧以上,说明本算法具有较好的实时性。

4 结束语

本算法在微分坐标形变方法的基础上进行了 2 处改进: 添加了超定方程组中方程的权重; 添加了形变的中心约束。因此,在保持原算法特点的同时,能够更好地按照骨架进行形变和保持体积,极大地提高了形变的逼真度。第 1 个改进为形变最明显也最容易失真的位置上的每个点添加了一个全局约束,以减小这些重要部位形变后位置的偏移。第 2 个改进能够体现不同类型表面的形变特征,使算法能够根据模型的骨架或不同部位的材质表现出逼真的形变效果。这 2 项改进互为补充,只有同时使用才能获得较好的形变结果。

本方法也有许多值得进一步完善的地方,比如中心控制点控制范围的选取。如果范围过小,可能造成关节附近的某些部分未被列入范围而失真;如果范围过大,则可能导致原本不受中心控制点约束的部分被中心控制点约束,也会带来失真。因此,如何在网格上准确划分控制范围有待于进一步的研究。

致谢 向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是国防科技大学计算机学院博士研究生徐凯、王彦臻等同志表示感谢。

参考文献

- [1] Thalmann N M, Laperrière R, Thalmann D. Joint-dependent Local Deformations for Hand Animation and Object Grasping[C]//Proc. of Graphics Interface. Edmonton, Canada: [s. n.], 1988: 26-33.
- [2] Komastu K. Human Skin Model Capable of Natural Shape Variation[J]. The Visual Computer, 1988, 3(5): 265-271.
- [3] Lewis J P, Cordner M, Forg N. Pose Space Deformation: A Unified Approach to Shape Interpolation and Skeleton-driven Deformation[C]//Proc. of ACM SIGGRAPH'00. New York, USA: ACM Press, 2000: 165-172.
- [4] Pike P, Sloan J, Charles F, et al. Shape by Example[C]//Proc. of ACM SIGGRAPH'01. New York, USA: ACM Press, 2001.
- [5] Sorkine O, Cohen-OR D, Lipman Y. Laplacian Surface Editing[C]//Proc. of SIGGRAPH'04. New York, USA: ACM Press, 2004.
- [6] Sorkine O. State-of-the-art Report: Laplacian Mesh Processing[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4): 789-807.
- [7] Zayer R, Ross C, Karni Z, et al. Harmonic Guidance for Surface Deformation[J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 601-609.