

基于改进弹簧振子模型的实时肌腱模拟

李祐国¹, 熊岳山¹, 谭珂², 郭光友²

(1. 国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073; 2. 中国人民解放军总医院技术教育中心, 北京 100853)

摘要: 在膝关节前交叉韧带重建仿真系统中, 为了进行人体肌腱实时模拟, 提出一种基于改进弹簧振子模型的实时肌腱模拟方法, 通过定义非线性弹簧, 降低线性弹簧振子模型“超弹性”现象的发生概率, 从而增强肌腱应力的仿真效果, 利用添加临时性约束弹簧的方法进行碰撞处理, 同时用隐式欧拉方法求解模型, 提高肌腱模拟的整体性和实时性。实验结果表明, 该方法符合系统对实时性和真实感的要求。
关键词: 手术仿真; 前交叉韧带; 肌腱

Real-time Tendon Simulation Based on Improved Mass-spring Model

LI You-guo¹, XIONG Yue-shan¹, TAN Ke², GUO Guang-you²

(1. School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073;
2. Center for Technique Education, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853)

【Abstract】 In order to conduct real-time simulation for human tendon in rebuilt system of Anterior Cruciate Ligament(ACL), a real-time tendon simulation method based on improved mass-spring model is proposed. By defining non-linear spring, the probability of “super-elasticity” in linear spring model is cut down, which enhances the simulation effect of tendon force. The approach of adding temporary restriction springs is used to deal with collision, and the implicit backward Euler method is also used to solve the model. The real-time performance and integrity of simulation is promoted. Experimental results show this method meets the system requirement of real-time and realistic sense.

【Key words】 surgery simulation; Anterior Cruciate Ligament(ACL); tendon

1 概述

膝关节前交叉韧带(Anterior Cruciate Ligament, ACL)是哺乳类动物维持膝关节前向稳定性、防止胫骨前移的基本结构。前交叉韧带损伤治疗比较困难, 病废率较高。在多种前交叉韧带重建手术方法中, 自体腱性组织移植的手术成功率和恢复效果比较好, 但手术难度大, 需要训练。ACL重建术仿真系统是一个用计算机图形学的方法模拟真实的膝关节前交叉韧带重建手术过程的虚拟手术系统。

虚拟手术又称手术仿真, 是种专门用来模拟在手术过程可能遇到的各种现象的虚拟现实应用系统, 通过医生与虚拟人体器官和组织的交互完成对手术过程的模拟, 达到熟悉手术环境训练医生的目的。采用自体腱性组织移植的虚拟 ACL重建手术需要对人体肌腱进行实时模拟。

本文主要研究人体肌腱的模拟技术, 并提供一种主要依赖于物理模拟的广义绳状物体模拟方法。

2 相关问题

肌腱模拟属于一维弹性物体模拟, 又称绳状(线状)物体模拟。文献[1]将外科手术线模拟分为3层模型: 几何模型, 医学模型和碰撞模型。在几何模型层, 将线型物体简化为轴和围绕轴的外表面, 轴通过一系列离散控制点和样条曲线模拟, 外表面由普通圆柱体组成。在医学模型层, 采用2种变形方法: 第1种方法类似弹簧振子模型, 对能量项变形后直接采用牛顿第二定律求解; 第2种方法是使线型物体的伸长能量和弯曲能量的合势能最小化。在碰撞模型层, 将线模型近似为一系列相交圆球, 用罚函数法处理检测到的碰撞, 同时用拉格朗日乘子法进行约束处理。该方法解决了绳状物体渲染时的外观连续性问题, 但是不能保证视觉模拟的准确

性; 并且该方法碰撞和约束处理较复杂。文献[2]根据CosseratII理论(偶应力理论), 通过有限元方法建立绳索基于物理的形变模型, 并给出一种加速该模型方程组求解的方法, 得到的模拟结果具有良好的扭曲效果, 即绳模拟具有6自由度, 并且有限元方法使得该物理模拟较为可靠。文献[3]针对超弹性棒提出一种自适应接触模型, 将原物体抽象为一组刚性短棒, 在模型与自体或其他物体发生接触的位置及交互点, 对原短棒细分以提高该位置自由度。但是该方法得到的弹性棒在接触点必须加入更多的分析来处理相对滑动问题。还有学者曾经针对外科手术中的缝合技术提出用弹簧振子模型模拟手术线并完成打结等复杂操作, 但是没有给出实际算法和结果。

本文借鉴Lenoir的3层模型思想, 在几何模型层, 将肌腱模型抽象为中心线和圆柱, 渲染时则采用真实肌腱网格数据; 在医学模型层, 对中心线采用改进的弹簧振子模型, 并使用隐式欧拉方法计算模型状态信息; 在碰撞模型层, 对碰撞进行预测和避免, 使用添加临时性约束弹簧的方法处理预测到的碰撞。

3 改进的弹簧振子模型

本文所使用的肌腱几何模型是根据医学影像数据使用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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: 李祐国(1984—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机应用, 虚拟现实; 熊岳山, 教授、博士生导师; 谭珂, 工程师; 郭光友, 教授

收稿日期: 2009-03-15 **E-mail:** youguo.li@gmail.com

3D Max 建立的表面网格模型。这个表面网格模型只能表现肌腱的静态外观，不具有肌腱组织的物理特性。为配合系统力反馈设备，要求肌腱模拟具有较高的物理特性，因此，要建立物理模型。考虑到肌腱是高弹性绳状物体，先根据真实肌腱的物理特性，建立参数合适的的弹簧振子模型，并将该模型应用于手术仿真整个操作和计算过程，然后在每次需要视觉渲染时逐段替换为人体肌腱的网格模型。

首先将肌腱抽象为多个线段相连而成的中心线和以中心线各段为轴的圆柱体，再根据该折线段建立一维弹簧振子模型。与一般的弹簧振子模型相同，线段的端点称为质点 $i(i=0,1,\dots,n-1)$ ，质点的质量为 m_i ，连接相邻质点的弹簧称为结构弹簧(structure spring)，连接质点 i 与质点 $i+2$ 的弹簧称为剪切弹簧(shear spring)，所有弹簧无质量。整个模型在时刻 t 的状态由内部状态和外部状态组成。模型内部状态包括：质点当前位置 x_i ，速度 v_i 和自碰撞信息。模型外部状态包括：与其他物体的碰撞信息以及模型受到的各种外部约束(如拉力等)。

对于基本的弹簧振子模型，根据胡克定律，弹簧应力为

$$f = k|\square x| \quad (1)$$

其中， $f, k, \square x$ 分别为标量力、劲度系数和形变量。

为减小存在弹簧相连的质点间相对速度，增加速度关联力 $k_d v$ ，质点之间作用力可表示为

$$f_{ij} = k_s \left(|x_{ij}| - l_{ij} \right) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} + k_d v_{ij} \quad (2)$$

其中， $x_{ij} = (x_j - x_i)$ ； $v_{ij} = (v_j - v_i)$ ； k_s, l_{ij} 和 k_d 分别是弹簧的劲度系数、初始长度和速度阻尼系数。

基本弹簧振子模型(线弹性弹簧振子模型)具有超弹性现象：当质点受力很大时，受力点附近形变量过大，形变大部分集中在受力点附近，而其他部分形变较少。同时，基本弹簧振子模型形变时的应力是线性的，而真实的肌腱在拉伸形变时非线性应力增大，当拉伸形变较大时应力迅速增大。为贴近肌腱应力非线性增大的特性和减弱超弹性现象，改进基本弹簧振子模型，定义弹簧应力符合式(3)，并将关联速度的力做类似调整，则式(2)可改写为式(4)。

$$f = k|\square x|^p \quad (3)$$

$$f_{ij} = k_s \left(|x_{ij}| - l_{ij} \right)^p \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} + k_v |v_{ij}|^{q-1} v_{ij} \quad (4)$$

其中， p, q 为常数系数。

由 $\sum_{j=0, j \neq i}^{n-1} f_{ij}$ 根据式(4)可以计算出模型内力，模型中任意质点受到的合力可表示为

$$f_i = \sum_{j=0, j \neq i}^{n-1} f_{ij} + f_i^{ext} \quad (5)$$

其中， f_i^{ext} 是质点 i 受到的重力、与质点 i 相邻的 2 个圆柱体受到的碰撞力以及摩擦力对该质点的分量及质点 i 受到控制力的总和。

4 肌腱行为的实时模拟

4.1 肌腱行为中的碰撞预测与处理

在虚拟 ACL 重建术中，肌腱模型需要处理的碰撞问题主要包括：自体碰撞，多根肌腱之间碰撞，肌腱与骨骼隧道碰撞。如果采用对肌腱表面几何元素(点、线、三角形)进行碰撞检测并处理的方法，算法复杂度很大，难以满足系统实时性要求。针对前面的模型，采用检测几何体间距离的方法预

测可能发生的碰撞，并通过加入临时性约束弹簧模拟真实碰撞。临时性约束弹簧是当 2 个几何体之间距离小于阈值时在 2 个几何体距离最近 2 点之间加入的约束弹簧。弹簧起到减慢和阻止几何体继续靠近的作用，当几何体间距离不小于阈值时取消。

算法 1(肌腱自碰撞、多根肌腱之间碰撞的预测和处理)

Step1 计算没有弹簧相连的圆柱体对的重心距离；

Step2 对于重心距离小于碰撞阈值与圆柱体轴线长度之和的圆柱体对，计算他们的最短距离 d_1 ；

Step3 对于 d_1 小于肌腱间碰撞预测距离 $d_{collision1}$ 的圆柱体对，将距离最近 2 点的位置记为碰撞位置并在这 2 点间加入原长 $d_{collision1}$ 的约束弹簧；

Step4 计算约束弹簧弹力和圆柱体对之间的摩擦力，分配到圆柱体对各质点。

算法 2(肌腱与双骨骼隧道碰撞的预测和处理)

Step1 判断模型各圆柱体所处的隧道段；

Step2 对于圆柱体在某段隧道内部的情况，计算圆柱端点即质点距离隧道轴线距离 d_2 ，如果隧道半径 $R - d_2$ 小于肌腱与骨隧道碰撞预测距离 $d_{collision2}$ ，在该质点与轴线上距该质点最近位置之间加入原长 $R - d_{collision2}$ 的约束弹簧；

Step3 对于圆柱体一端在隧道内一端在隧道外的情况，计算圆柱体与隧道底面圆环距离 d_3 ，如果 $d_3 < d_{collision2}$ ，在圆柱与圆环最近点之间加入原长 $d_{collision2}$ 的约束弹簧；

Step4 计算约束弹簧弹力和圆柱体与隧道摩擦力，分配到相应质点。

对于含质点较多的模型，可以改进层次包围盒碰撞检测算法，适当放大包围盒大小找出小于阈值距离的几何体对，优化碰撞预测过程。碰撞处理方式相同。对于模型与大质量刚性物体碰撞，可以直接约束质点位置和速度^[4]，使模型加速收敛到稳定状态。

4.2 肌腱行为模型求解

模拟过程以时间片 Δt 推进， Δt 后的状态依赖于当前状态信息和推算 Δt 内模型状态变化量的策略。通常用显式欧拉方法计算位置与速度的变化量：

$$\begin{pmatrix} \square x \\ \square v \end{pmatrix} = \square t \begin{pmatrix} v_0 \\ M^{-1} f_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中， Δx 是 Δt 内质点的位置变化量； Δv 是速度变化量； M 是质量矩阵； v_0 是当前速度； f_0 是当前受到的合力。

上述计算方法有 2 点不足：(1)要求时间片足够小，以保证系统稳定性。但是，时间片过小导致在模拟时必须增加计算次数以满足模拟的连贯性和真实感。(2)只根据当前状态计算加速度再得到速度和位置变化量，导致 i 质点的信息变化至少经过 $\left\lfloor \frac{|j-i|}{2} \right\rfloor$ 次模型状态更新才会对 j 质点产生影响，系统整体更新迟滞且收敛到稳定状态缓慢。所以，本文采用文献[4]针对布料模拟时提出的隐式欧拉方法。

$$\begin{pmatrix} \square x \\ \square v \end{pmatrix} = \square t \begin{pmatrix} v_0 + \square v \\ M^{-1} f(x_0 + \square x, v_0 + \square v) \end{pmatrix} \quad (7)$$

该方法将模型一个时间片后的速度和位置引入方程，估算当前时间片内速度及位置的实际变化量。该方法允许设置较大的时间片，提高模拟效率，并且使模型的整体性和稳定性增强。其他参数相同，为保证 60 个质点的模型稳定模拟，显式方法 Δt 的上限为 0.002，隐式方法为 0.05。

由于 $f(x_0 + \Delta x, v_0 + \Delta v)$ 项未知, 因此可用其在 f_0 处的一阶泰勒展开作为 $f(x_0 + \Delta x, v_0 + \Delta v)$ 项的近似值。

$$f(x_0 + \Delta x, v_0 + \Delta v) = f_0 + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可推得式(9):

$$\left(I - \Delta t M^{-1} \frac{\partial f}{\partial v} - \Delta t^2 M^{-1} \frac{\partial f}{\partial x} \right) \Delta v = \Delta t M^{-1} \left(f_0 + \Delta t \frac{\partial f}{\partial v} v_0 \right) \quad (9)$$

求解 $3n$ 阶线性方程组(9), 可以求出 Δv , 然后根据式(7)得到 Δx , 再根据位置和速度变化量得到 Δt 后的状态信息, 最后更新当前状态等待计算下一状态。

显然, $\left(I - \Delta t M^{-1} \frac{\partial f}{\partial v} - \Delta t^2 M^{-1} \frac{\partial f}{\partial x} \right)$ 是个正定对称稀疏矩阵,

用共轭梯度法求解式(9)效率较高。为进一步提高求解效率, 对原共轭梯度法进行改进, 通过设置预条件加速迭代的收敛。实验证明, 该计算方法能有效提高此模型的求解速度。

4.3 肌腱行为模拟中的外观渲染

将肌腱静态表面网格化, 并在初始化时读入网格; 每次需要渲染肌腱时, 根据当前模型质点位置, 将肌腱网格映射到新的位置。网格化将肌腱表面横向分 n 层, 每层包括若干个边缘点和 1 个中心点, 所有相邻层边缘点为顶点的无重叠三角面片构成肌腱表面网格。网格的几何信息包括: 第 i 层第 j 个边缘点的位置 Pos_i^j , 法向量 Nor_i^j , 第 i 层中心点的位置 Pos_i 以及一些纹理和索引信息等。计算第 i 层第 j 个边缘点当前信息的方法是: 预计算各层边缘点相对本层中心点的位置向量; 通过每层中心点位置和当前质点位置, 计算各层的平移距离和旋转角度; 根据位置向量计算各层边缘点的位置和法向量信息, 并更新肌腱网格。

5 实验结果

在 CPU 为 Intel P4 2.8 GHz, 主存为 512 MB, 配置有 nVIDIA GeForce2 显卡的个人计算机上, 使用 OpenGL 图形库和 VC++ 6.0 开发环境对面网格模型进行人体肌腱模拟。图 1~图 4 显示了用改进的弹簧振子模型结合隐式求解方法模拟的肌腱之间碰撞、自体碰撞及复合肌腱模型与 ACL 手术仿真系统中双骨隧道的碰撞处理效果。

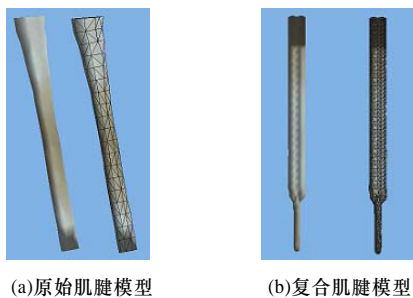


图 1 肌腱模型和网格化结果

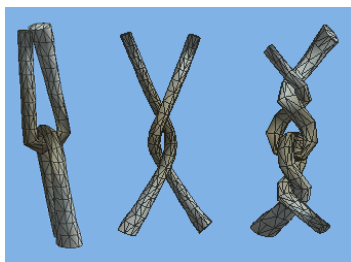


图 2 肌腱之间碰撞模拟结果

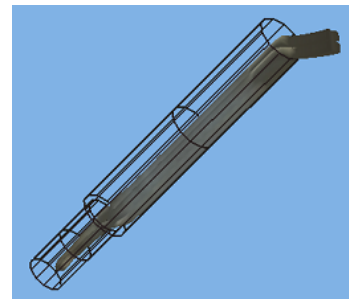


图 3 拖拽复合肌腱模型穿过双骨隧道模型的模拟结果

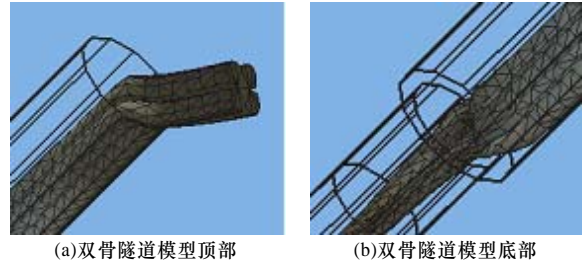


图 4 拖拽复合肌腱模型穿过双骨隧道模型的模拟细节

在图 2 中, 前 2 个场景为 2 根独立肌腱不同方式碰撞处理结果, 第 3 个场景为肌腱被拖拽和扭曲, 自碰撞与肌腱之间碰撞同时存在时的处理结果。实验结果表明, 肌腱发生碰撞的位置存在合适应力, 不会发生穿透失真的情况。

为提高仿真系统效率, 将手术中两折肌腱拖拽四折肌腱穿过双骨隧道的行为简化为拖拽复合肌腱穿过双骨隧道。从图 3 可以看出, 整个拖拽过程中模型能较好预测和处理与双骨隧道之间的碰撞, 模型运动始终受到双骨隧道的约束。

为检验模型的实时性, 本文在实验中对 2 种不同的肌腱模型分别计算场景刷新时的帧率, 如表 1 所示。

表 1 不同模型仿真时的帧率

模型名称	网格顶点数	三角面片数	模型质点数	帧率
原始肌腱(2个)	158	312	20	181
复合肌腱模型	1 478	4 694	60	51

从表 1 可知, 本文方法满足手术仿真对真实感和实时性要求。

6 结束语

本文提出一种基于改进的弹簧振子模型的人体肌腱物理模拟方法, 并实时模拟了满足视觉需求具有物理特性的人体肌腱。该方法简单高效, 适用于多数一维物体的模拟, 可以完成缠绕、打结等复杂操作。由于本文方法的求解过程采用共轭梯度法, 当质点数量很大时不能保证实时计算, 因此需要改进碰撞检测方法以提高检测效率, 这是今后的研究方向。

参考文献

- [1] Lenoir J. Surgical Thread Simulation[J]. IEEE Trans. on Modelling and Simulation, 2002, 12(3): 102-107.
- [2] Spillmann J. Cosserat Rod Elements for the Dynamic Simulation of One-dimensional Elastic Objects[C]//Proc. of ACM SIGGRAPH'07. San Diego, USA: [s. n.], 2007.
- [3] Teschner M. An Adaptive Contact Model for the Robust Simulation of Knots[C]//Proc. of the ACM Int'l Conf. on Computer System. [S. l.]: ACM Press, 2008.
- [4] David B. Large Steps in Cloth Simulation[C]//Proc. of the ACM Int'l Conf. on Computer Graphics. New York, USA: ACM Press, 1998.

编辑 陈文