

# 用于实时柔性触觉再现的平行菱形链连接模型

张小瑞 宋爱国 孙伟 邹垂国

(东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096)

**摘要** 精度高且实时性好的柔性触觉变形模型是实现触觉再现系统的关键。提出了一种新的基于物理意义的平行菱形链连接触觉变形模型, 系统中各个链结构单元相对位移的叠加对外等效为物体表面的变形, 与之相连的弹簧弹性力的合力等效为物体表面的接触力。使用 Delta 6-DOF 手控器, 建立了触觉再现实验系统, 对柔性体的接触变形和实时虚拟触觉反馈进行仿真, 实验结果表明所提出的模型不仅计算简单, 而且能够保证触觉接触力和形变计算具有较高精度, 满足虚拟现实系统对精细作业和实时性的要求。

**关键词** 平行菱形链连接模型 柔性触觉再现 触觉反馈 虚拟现实

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)02-0346-06

## A Parallel Rhombus-chain-connected Model Applied to Real-time Softness Haptic Display

ZHANG Xiao-ru, SONG Aiguo, SUN Wei, ZOU Chuiguo

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** Softness haptic deformation model with high precision and fast speed is a key issue to the realization of haptic rendering system. A novel parallel rhombus-chain-connected haptic deformation model based on physics is proposed in this paper. The accumulation of relative displacements in every chain structure unit is equal to the object surface deformation, and the resultant force of springs is equal to the external force. Haptic display system is established using the hand controller of Delta 6-DOF, then contact deformation of soft objects and real-time virtual haptic feedback is simulated. Experiment results show that the proposed model not only has less calculation but also can ensure synchronously higher precision in calculating contact force and deformation, and is able to satisfy the requirement of virtual reality system for real time performance and accurate operation.

**Keywords** parallel rhombus-chain-connected model; softness haptic display; haptic feedback; virtual reality

## 0 引言

随着虚拟现实技术应用范围的日益扩大, 特别是在远程医疗、深空探索、海洋开发、虚拟制造等领域的应用, 作业任务越来越精细, 感知对象越来越复

杂, 由于触觉信息所提供的信息量极其丰富, 它的反馈对于虚拟操作的重要性与日俱增, 其发展受到了越来越多研究人员的关注, 实时柔性触觉再现技术已经作为一种新兴的人机交互手段崭露头角。其中, 针对虚拟柔性体的触觉建模已成为当前虚拟现实技术研究的前沿和重点。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2002CB312102); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA01Z329, 2006AA04Z246); 国家自然科学基金项目 (60775057, 60675047)

收稿日期: 2008-07-31; 改回日期: 2008-12-09

第一作者简介: 张小瑞 (1979—), 女。东南大学测量计量技术及仪器专业博士研究生。主要研究方向为人机交互与虚拟现实技术。Email: zxr365@126.com

虚拟触觉交互系统中所采用的模型,直接决定了交互中触觉反馈的精度与速度,要让操作者感受到与真实环境中一致的真实触觉信息,关键是要建立准确的基于物理意义的触觉模型。目前该领域的研究越来越深入,早在 2000 年,Popescu 等人首先提出了虚拟现实基于力反馈的交互系统模型<sup>[1]</sup>。2001 年, Song 等人针对多面体无摩擦接触情况,给出相应的接触力计算公式<sup>[2]</sup>。2003 年, Luciano 等人针对多点接触情况,提出先分别计算虚拟物体多个接触点的作用力,而后用数学平均求合力的方法<sup>[3]</sup>。2005 年, AL-Yahmadi 研究了两外力对柔性模型的控制<sup>[4]</sup>。同年国内浙江大学杨文珍等人提出基于多点力/力矩平衡的力觉生成和反馈方法<sup>[5]</sup>。2006 年,国内东南大学吴涓等人提出成同心圆分布的力/变形计算公式<sup>[6]</sup>。2007 年, Ortega 对具有 6 个自由度的力反馈进行研究<sup>[7]</sup>。但以上这些方法大都是基于刚性物体间的接触及平衡关系,物体表面不发生变形,接触力的计算也只涉及到力/力矩的动力学平衡方程。然而在现实世界中,绝大部分物体是可变形的非刚性物体,故对柔性体的触觉变形建模研究更具有实际应用价值。

目前,常用的基于物理意义的柔性体变形模型中,有限元模型<sup>[8-9]</sup>虽然较为准确,但涉及大量繁复的计算,实时交互性能差。弹簧-质点模型<sup>[10]</sup>具有结构简单、计算速度快,但是精度和稳定性有限。长单元模型<sup>[11]</sup>具有较高的触觉反馈刷新速度,但由于模型抽象度较高,因此计算精度较低。Cotin 等人提出的张量质点模型<sup>[12]</sup>,能够方便实现切割或撕裂等操作,但稳定性问题依然存在。边界元模型<sup>[13]</sup>计算简单,但在稳定性方面却存在一定的困难。Kin 等人提出的形状保持链模型 (S-Chain Model)<sup>[14-15]</sup>具有实时性较好的优点,但链元素是基于刚性体为假设的,精度不高。以上说明,这些柔性体的触觉物理模型均存在由于变形计算复杂和仿真精度不高等问题。因此,在保证触觉变形模型准确性的同时,简化算法,从而提高仿真速度和实时性是当前虚拟触觉再现系统需要解决的首要问题。

鉴于上述问题,提出了一种新颖的基于平行菱形链连接的实时柔性触觉再现模型,其特点是通过改变链结构单元中菱形的长度和夹角就可对不同的柔性体进行仿真,从而实现用一种模型对不同组织进行仿真,达到简化系统的目的。采用该模型,能快速准确的计算变形量,实现对柔性体

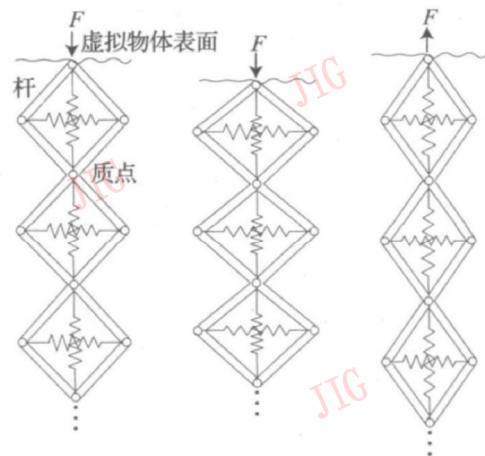
的实时变形仿真,对提高虚拟触觉再现的逼真度具有重要意义。

## 1 基于平行菱形链连接的柔性触觉变形模型的原理

由于在受力状态下,柔性体呈现出受力面的位置、施加力的方向、大小等都在实时变化,这些均给力/力矩平衡方程的建立带来困难。而本文方法的基本思想是施加在柔性体表面上的力,通过与用户直接交互的那个菱形链结构单元传递到周围与其相连的其他各个链结构单元,由于单元之间的链连接结构的运动相关关系,将引起与其相连的链结构单元同时产生位移并发生变形。系统中各个链结构单元的相对位移的叠加对外等效为物体表面变形,与之相连的弹簧弹性力的合力等效为物体表面的接触力。

### 1.1 模型的结构

提出的平行菱形链连接柔性触觉变形模型结构如图 1 所示。该模型由多个平行模型结构串联组成,每个平行菱形链结构单元有四根平行连杆组成,各杆之间由质点相连,各个质点之间的相互作用力等效为内部的法向和切向弹簧作用力。



(a) 初始状态 (b) 压缩后的状态 (c) 拉伸后的状态

图 1 平行菱形链连接模型结构图

Fig 1 Structure of parallel rhombus-chain-connected model

### 1.2 变形计算

在该模型中,假定各平行菱形链结构单元中各菱形杆长均为  $a$ ,各处接触都是理想光滑的,且纵向和切向上的弹簧具有不同的弹性系数,以产生不同的切向力和法向力,不计摩擦和杆件自重。

在给定虚拟接触力  $F$  作用下, 当受力变形发生时, 由于该模型中各个链结构单元同时产生位移, 并同时发生变形, 为分析方便, 仅考虑与用户直接交互的那个菱形链结构单元的受力和变形情况, 其他链结构单元的受力和变形情况与此类似, 受力分析如图 2 所示。本文实现了平行菱形链连接模型在拉拽、按压变形下的仿真效果。

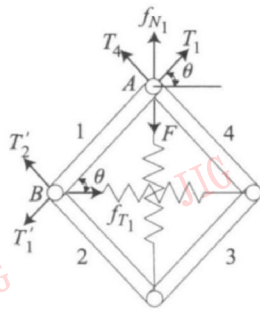


图 2 菱形链连接模型的受力分析

Fig 2 Force analysis of rhombus-chain-connected model

对质点  $A, B$  分别进行受力分析, 根据受力平衡关系得:

$$\begin{cases} T_1 = T_4 \\ f_{N1} = k_{N1} \Delta l_1 \\ T_1 \sin\theta + T_4 \sin\theta + f_{N1} = F \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T'_1 = T'_2 \\ T'_1 = T_1 \\ T'_1 \cos\theta + T'_2 \cos\theta = f_{T1} \\ f_{T1} = k_{T1} \Delta v_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $T_i, T'_i$  分别表示第  $i$  根杆对与它相连的质点之间的作用力、反作用力。  $f_{N_i}, f_{T_i}$  分别表示第  $N_i$  条链上法向力、切向力。  $k_{N_i}, k_{T_i}$  分别表示第  $N_i$  条链上法线、切线方向上弹簧的弹性系数。  $\Delta l_i, \Delta v_i$  分别表示第  $N_i$  条链在法向上、切向上的变形量。初始夹角假定为  $\theta$ 。

由式 (1) 和式 (2) 得:

$$k_{T1} \Delta v_1 \tan\theta + k_{N1} \Delta l_1 = F \quad (3)$$

假定初始夹角变形量为  $\Delta\theta$  由菱形的几何性质可得变形量为

$$\begin{cases} \Delta v_1 = 2(a \cos(\theta + \Delta\theta) - a \cos\theta) \\ \Delta l_1 = 2(a \sin(\theta + \Delta\theta) - a \sin\theta) \end{cases} \quad (4)$$

对式 (4) 整理可得:

$$\Delta v_1 = - \tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| \Delta l_1 \quad (5)$$

把式 (5) 代入等式 (3) 得:

$$\Delta l_1 = \frac{F}{-k_{T1} \tan\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \tan\theta + k_{N1}} \quad (6)$$

$$\Delta v_1 = \frac{\tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| F}{k_{T1} \tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| \tan\theta - k_{N1}} \quad (7)$$

$N_i$  条链在法线方向上总的变形量为

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{N_i} \Delta l_i = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{F}{-k_{T1} \tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| \tan\theta + k_{N1}} \quad (8)$$

切线方向上第  $N_i$  结构链的变形量为

$$\Delta v_i = \Delta v_1 = \frac{\tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| F}{k_{T1} \tan\left|\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right| \tan\theta - k_{N1}} \quad (9)$$

在计算柔性体受力变形模型中, 计算量的大小在很大程度上取决于链结构单元变形量  $\Delta\theta$  的大小。令变形边界点的变形率  $\lambda = \Delta\theta/\theta$  当  $\lambda < 0.05$  时, 认为在此边界以外外力产生的变形量为零, 它的变形主要由柔性体的膨胀内力产生。

根据等效关系, 假定法线上第  $N_i$  条链上的  $i$  个弹簧的弹性系数是相同的。即

$$k_{N1} : k_{N2} : k_{N3} : \dots : k_{Nm} = 1 : 1 : 1 : \dots : 1 \quad (10)$$

切向弹簧的弹性系数  $k_{T_i}$  是影响接触力与变形计算的关键。Ojima 等人基于小波分析的方法从理论上证明了: 切线方向上相邻的弹簧弹性系数之比为常数, 即第  $i$  个切向弹簧的弹性系数  $k_{T_i}$  和第 1 个切向弹簧弹性系数  $k_{T_1}$  呈如式 (11) 所示的指数倍关系<sup>[16]</sup>:

$$\frac{k_{T_i}}{k_{T_1}} = e^{\frac{i-1}{\beta}} = \alpha_i \quad i = 2, 3, \dots, m; \alpha_i \geq 1 \quad (11)$$

式中,  $\beta$  为常数, 柔性体的弹性性能取决于  $k_{T_1}, k_{T_i}$  越小表示柔性体越柔软。对人体肝脏来说一般取  $\beta = 2.0, k_{T_1} = 1.8 \text{ N/m}, k_{N1} = 1.5 \text{ N/m}$  进行模拟仿真<sup>[17]</sup>。

取整体模型为研究对象, 应用虚位移原理求解虚拟接触力  $F$  与总变形之间的关系为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \left| \frac{1}{2} k_{N_i} \Delta l_i^2 + \frac{1}{2} k_{T_i} \Delta v_i^2 \right|}{\Delta L} \quad (12)$$

接触力  $F$  的大小与菱形结构的变形是密切相关的, 但由变形率  $\lambda$  的临界性可知, 变形区域也不会无限扩大, 随着力的增大, 变形区域增大的速度将会越来越缓慢。

## 2 虚拟实时柔性触觉再现系统的实现

### 2.1 实时柔性触觉再现

实时柔性触觉再现已成为当前人机交互领域的最新技术,在交互过程中有着不可替代的作用,对人们的信息交流和沟通方式将产生深远的影响。在虚拟现实系统中,所谓实时柔性触觉再现,是指操作者通过触觉人机交互装置实时进行触摸、感知和操纵柔性体,将虚拟环境中生成的触觉信息反馈给操作者,增强虚拟环境的真实感、沉浸感、提高操作者的控制操作能力,其核心是要求虚拟柔性体的变形应尽可能与真实情况一致。

### 2.2 程序实现

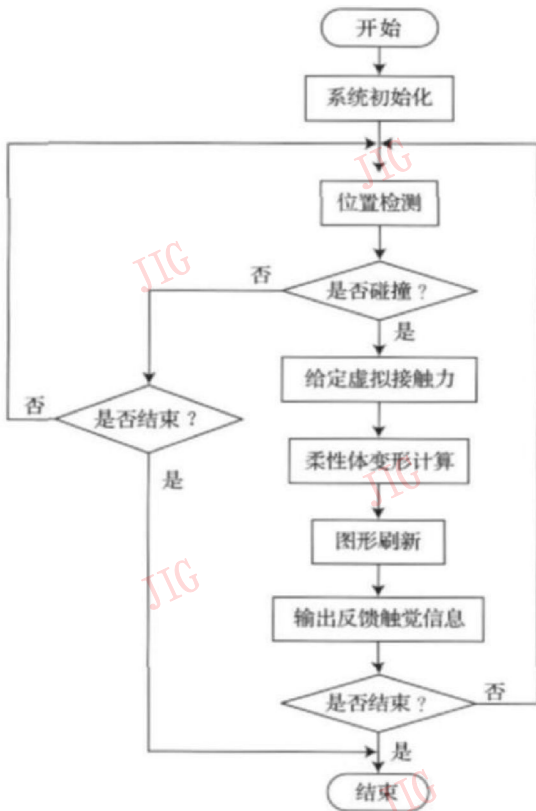


图 3 实时触觉反馈操作流程

Fig 3 Flow chart of real-time haptic feedback operation

在实时柔性触觉再现系统中,利用软件编程实现镊子对肝脏的按压、拉拽的虚拟变形仿真并通过手控器进行实时触觉反馈。在 Inter(R) Core(TM) 2 2.00GH z 2GB 内存, NV IDIA GeForce 8 400 GS 显卡的 PC 机上,以 OpenGL 图形库为基础,用 VC++ 6.0 作为开发环境,采用平行菱形链连接建模进行了形变模拟实验,所用的镊子和肝脏模型都直接采

用了从 3ds max 9.0 软件中导出的 OBJ 格式,模型的获取和修改非常方便。其程序流程图如图 3 所示。

首先,对系统进行初始化,包括虚拟场景及图形的初始化;继而进行碰撞检测,若镊子没有接触肝脏,则继续进行碰撞检测,直到镊子接触到肝脏则为发生碰撞,此时记录下碰撞的位置,该位置即为被机械作用而发生变形的接触点,根据给定的虚拟接触力,进行肝脏的变形计算,同时把形变信息传递给图形刷新模块进行更新后,通过 Delta 手控器把触觉信息反馈给操作者,使其感觉到触觉信息的变化。

### 2.3 实验结果

本文采用瑞士 Force Dimension 公司提供的 Delta 6-DOF 手控器,建立了实时柔性触觉再现系统,对相关算法的可行性以及触觉再现系统人机交互过程的有效性和可靠性进行验证,实验仿真环境如图 4 所示。

手控器的工作空间范围为平移  $\Phi 360 \text{ mm} \times L300 \text{ mm}$  和旋转  $\pm 20 \text{ deg/axis}$  各个方向的最大可持续反馈再现的力和力矩大小分别为  $20.0 \text{ N}$  和  $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 直线运动和角运动的分辨率分别小于  $0.03 \text{ mm}$  和  $0.04^\circ$ 。独特的平行机械结构和基座式的执行机构使得 Delta 手控器具有较高的反馈刚度、解耦的平移与旋转运动和较低的惯量等特点。通过手控器控制虚拟环境中虚拟探针的运动,当虚拟探针与虚拟柔性体接触时,依据给定的虚拟接触力及提出的触觉变形模型,模拟柔性体的变形,同时将受力后对应的触觉信息通过手控器反馈给操作者。以 3 116 个质点, 6 228 个三角网格构成的虚拟肝脏和 174 个质点, 348 个三角网格构成的虚拟医用镊子为例,完成一次图像刷新耗时  $52 \text{ ms}$ , 完成一次接触力计算所用时间小于  $1 \text{ ms}$ 。实际在操作手控器与虚拟肝脏交互的过程中,图像流畅,无停顿感,触力觉感觉平稳,模拟效果逼真,其变形前、后(压缩和拉伸)示意图分别如图 5、图 6 所示。

为验证本文提出的触觉变形模型的准确性,采用文献 [18] 提出的图像边缘检测方法,在相同接触力的情况下,对柔性体变形进行实际测量。理论计算和实际测量的变形分布及对应的绝对误差分布如图 7 所示。从图 7 可以看出,理论计算和实际测量的两条曲线基本吻合,误差较小。

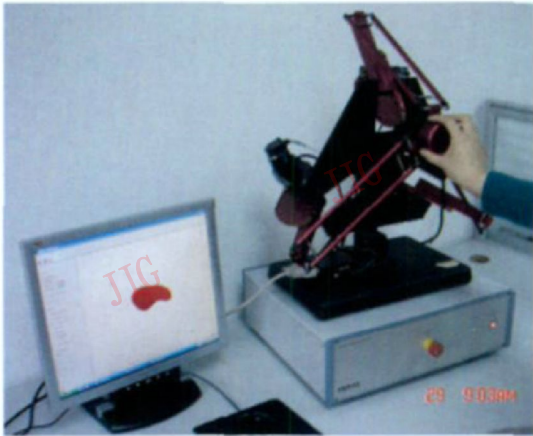
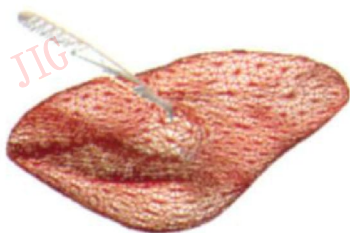


图 4 实验环境

Fig.4 Experimental environment



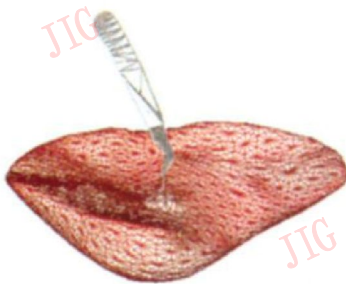
(a) 三角网格面片



(b) 渲染后的效果

图 5 虚拟肝脏受压后受力变形示意图

Fig.5 Deformation schematic diagram of virtual liver compressed



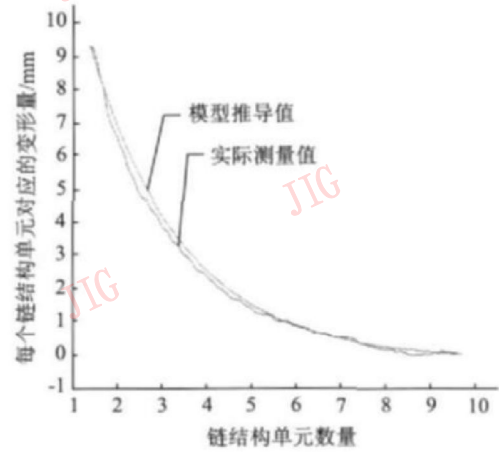
(a) 三角网格面片



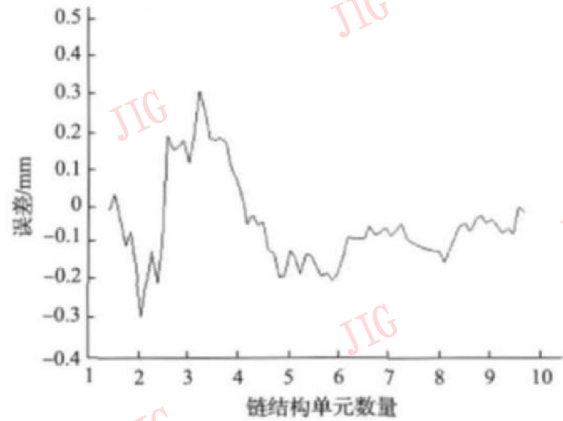
(b) 渲染后的效果

图 6 虚拟肝脏受拉后受力变形示意图

Fig.6 Deformation schematic diagram of virtual liver stretched



(a) 实际测量与模型计算的变形分布



(b) 绝对误差

图 7 实际测量与模型推导计算的变形分布

Fig.7 Deformation distribution curve of the actual measurement and the derived from model

### 3 结 论

针对实时柔性触觉再现系统的需要,提出了一种新颖的基于物理意义的平行菱形链连接触觉变形模型,由于该模型中各个链结构单元中菱形的长度一致,计算量小,能够快速、精确地计算形变,各个质点的相对位移和弹性力的叠加,等效为柔性体的变形和接触力。在 Delta 手控器上,对虚拟肝脏的接触变形和实时触觉反馈进行仿真,实验结果表明该模型可使操作者真实地感知到操作对象的触觉信息。

实时柔性触觉建模是一个新兴的研究领域,目前的研究成果离理想的“所见即所感,看得见摸得着”的目标还有一定距离。今后还需进一步深入研究的工作主要包括:深入认识人的触觉感知的特性及机理,为实现更加逼真的仿真提供理论依据;实现多种触觉再现信息的融合,例如物体的温度、形状、刚度、纹理等,提高操作者的沉浸感;考虑柔性体的不均匀性、准不可压缩性、非线性、塑性、粘弹性等复

杂的材料性质<sup>[19]</sup>, 并能对复杂、多样的人体软组织的受力变形进行更精确定量的模拟, 以获得更加逼真的仿真模拟效果。

### 参考文献 (References)

- [1] Popescu V G, Bunde G C, Bouzit M, et al A virtual reality-based telerehabilitation system with force feedback [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2000, 4(1): 45-51
- [2] Song P, Kraus P, Kumar V, et al Analysis of rigid-body dynamic models for simulation of systems with frictional contacts [J]. Journal of applied mechanics, 2001, 68(1): 118-128
- [3] Luciano C, Banerjee P, DeFanti T, et al A framework for efficient and more realistic haptics applications [C] // Proceedings of the 23rd ASME International Computer and Information Engineering Conference, Chicago, IL, USA: [s.n.], 2003, 1097-1103
- [4] Al-Yahmadi A S, Hsia T C. Modeling and control of two manipulators handling a flexible beam [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2005, 6: 147-150
- [5] Yang Wen-zhen, Gao Shu-ming, Wan Hua-gen, et al Force generation and feedback for physically-based virtual hand grasp [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(6): 959-964 [杨文珍, 高曙明, 万华根等. 基于物理的虚拟手抓持力觉生成和反馈 [J]. 计算机学报, 2005, 28(6): 959-964]
- [6] Wu Juan, Song A r-guo, Li Jian-qing. Research on mass-spring force/deformation modeling for haptic display [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3152-3156 [吴涓, 宋爱国, 李建清. 用于虚拟力觉再现的弹簧-质点力-变形模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3152-3156]
- [7] Ortega M, Redon S, Coquillart S. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3): 458-468
- [8] Berkley J, Turkiyyah G, Berg D, et al Real-time finite element modeling for surgery simulation: An application to virtual suturing [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(3): 314-325
- [9] Hansen K V I, Brik L, Pedersen C F, et al Modelling of interaction between a spatula and a human brain [J]. Journal of Medical Image Analysis, 2004, 8(1): 23-33
- [10] Castaneda M A P, Cosio F A. Deformable model of the prostate for TURP surgery simulation [J]. Journal of Computers and Graphics, 2004, 28(5): 767-777.
- [11] Costa I E, Balaniuk R. LEM—an approach for real-time physically based soft tissue simulation [J]. In Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, 3: 2337-2343
- [12] Jia Shi-ryu, Pan Zhen-kuan. Deformation simulation of soft tissue based on tensor mass model in virtual surgery [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 437-452 [贾世宇, 潘振宽. 虚拟手术中基于 Tensor Mass 的变形仿真技术 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 437-452]
- [13] Monserrat C, Meier U, Alcaniz M, et al A new approach for the real-time simulation of tissue deformations in surgery simulation [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2001, 64(2): 77-85
- [14] Kim S Y. Medical simulation with haptic and graphic feedback [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4091: 171-178
- [15] Kim S Y, Kim K Y. Interactive racing game with graphic and haptic feedback [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4813: 69-77.
- [16] Ojima H, Nagase K, Hayakawa Y. Wave-based analysis and wave control of damped mass-spring systems [J]. In Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2001, 3: 2574-2579
- [17] Cui T, Song A I, Wu J. A mass-spring model for haptic display of flexible object global deformation [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, IEEE, 2007: 2753-2757.
- [18] Wu Juan. The research of haptic modeling and haptic interface for virtual environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2005 [吴涓. 虚拟环境的力觉建模及力觉感知接口技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005]
- [19] Gladilin E, Zachow S, Deuffhard P, et al On constitutive modeling of soft tissue for the long-term prediction of cranio-maxillofacial surgery outcome [C] // Proceedings of the 17th International Congress and Exhibition, London, England, UK: Elsevier, 2003, 1256: 343-348