

一种新颖的用于触觉再现的平行菱形链连接模型^①

张小瑞^② 宋爱国^③ 刘佳* 李建清

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

(* 南京信息工程大学信息与控制学院 南京 210044)

摘 要 针对如何提高虚拟触觉再现的精度与实时性问题,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。该模型中各个链结构单元中菱形的长度等比例变化,因而计算量小;改变链结构单元中菱形的长度和夹角就可方便对不同的柔性体进行建模,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。利用手控器对柔性体的接触变形和实时虚拟触觉反馈进行了仿真。实验表明所提出的方法适用于柔性体的触觉反馈计算,能够满足精细作业对虚拟现实系统的要求。

关键词 平行菱形链连接模型,触觉再现,虚拟现实

0 引 言

当前,不断优化和完善的图形算法及其软件已经能够使虚拟现实技术惟妙惟肖地模拟三维虚拟场景,而且人们希望模拟虚拟场景既“可望又可及”的要求又促使了近年来触觉再现和触觉交互技术的发展^[1,2],使得针对虚拟环境的触觉建模已成为当前虚拟现实技术研究的前沿和热点。建立准确的基于物理意义的触觉模型是建立让操作者感受到与真实环境中一致的真实触觉信息的虚拟触觉交互系统的关键。Popescu 等人在 2000 年就提出了虚拟现实基于力反馈的交互系统模型^[3]。Luciano 等人在 2003 年首先针对多点接触情况,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^[4]。AL-Yahmadi 在 2005 年研究了两外力对柔性模型的控制^[5],同年 Cornella 提出对人手抓取多边形柔性物体采用独立区域力封闭算法的思想^[6]。2007 年 Ortega 研究了具有 6 个自由度的力反馈^[7]。以上这些方法大都是基于刚性物体间的接触、碰撞及平衡关系的,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。而在现实世界中,绝大部分物体是可变形的非刚性

物体,因而对柔性物体的触觉变形建模研究更具有实际的应用价值。

在目前常用的基于物理意义的变形模型中,弹簧-质点模型运算速度快、实时性和交互性易于实现,但这种方法存在稳定性以及精确度有限的问题。有限元模型虽然可对物体的形变进行精确和定量的模拟,但由于网格的节点数多、节点间关系式复杂,因而计算的实时性差。边界元模型只对模型的边界进行离散,简化了计算,但在稳定性方面却存在一定的困难^[8]。Suvranu 等人提出的基于配点法的有限球(point collocation based method of finite spheres, PCMFS)^[9]模型,采用无网格方法,计算量小,不足之处在于计算精度不高。Kim 等人提出的形状保持链连接模型(shape retaining chain linked model, S-Chain Model)^[10,11]具有实时性较好的优点,但链元素是以刚性体为假设的,精度不高。长单元模型^[12]计算量小,求解方便,但计算精度较低。以上说明,大多数柔性物体的触觉物理模型均存在由于变形计算复杂和精确性不高等问题影响了计算的实时性和有效性,因而在保证触觉变形模型准确性的同时,简化算法和提高计算的实时性是虚拟触觉系统亟待解决的一个问题。

针对上述问题,本文提出了一种新颖的用于触

① 863 计划(2006AA01Z329, 2006AA04Z246, 2009AA01Z311, 2009AA01Z314),国家自然科学基金(60775057, 60675047)和教育部重点(107053)资助项目。

② 女,1979 年生,博士生;研究方向:人机交互与虚拟现实技术。

③ 通讯作者, E-mail: a.g.song@seu.edu.cn
(收稿日期:2008-05-05)

觉再现的平行菱形链连接模型,由于其单元之间的链连接结构关系,故当柔性体表面的某个链结构单元被推拉时,将引起与其相连的链结构单元同时发生相对位移与变形。柔性体的变形是各个质点相对位移的叠加,质点之间的相互作用力等效为内部法向及切向弹簧的作用力,弹簧弹性力的合力等效为物体表面的接触力。

1 平行菱形链连接触觉变形模型的建立

1.1 平行菱形链连接模型的结构

针对柔性体在受力状态下呈现出受力面的位置、施加力的方向及大小都在实时变化给力/力矩平衡方程的建立带来困难的问题,本文提出了一种平

行菱形链连接触觉变形模型,其结构如图 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由 4 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,每个节点与和它相邻的链结构单元有两根连杆是公用的。其变形的基本思想是:当模型中的某个链结构单元被推拉时,单元之间的链连接结构会引起与其相连的链结构单元同时产生位移,并同时发生变形。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。该方法由于各个链结构单元中菱形的长度成等比例变化,计算量小,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建模仿真。

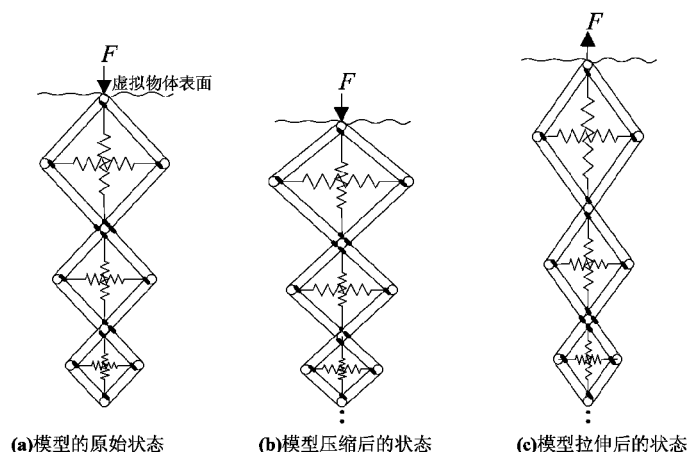


图 1 平行菱形链连接模型的结构

1.2 触觉变形的计算

在该模型中,设与用户直接交互的平行菱形链结构单元中菱形杆长为 a ,各菱形链结构单元中各杆长均以公比 q ($0 < q < 1$) 等比例变化。假定各处接触都是理想光滑的,且杆重和摩擦不计。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。

该模型中由于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,只需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,其它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。

分别以质点 A 、 B 进行受力分析,根据受力平衡关系有

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

$$\begin{cases} T'_1 = T'_2 \\ T'_1 = T_1 \\ T'_1 \cos \theta + T'_2 \cos \theta = k_{T1} \Delta w_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 f_{Ni} 、 f_{Ti} 分别表示第 N_i 条链上法向力、切向力。 k_{Ni} 、 k_{Ti} 分别表示第 N_i 条链上法线、切线方向上弹簧的弹性系数。 Δl_{io} 、 $\Delta l'_{io}$ 、 Δl_i 、 Δw_{io} 、 $\Delta w'_{io}$ 、 Δw_i 分别表示第 N_i 条链在法向上、切向上的初始变形量、变

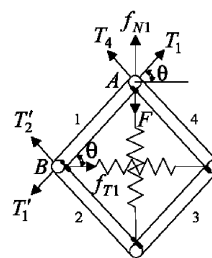


图 2 菱形链连接模型的受力分析

形后的变形量、变形量。 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。初始夹角及变形量分别假定为 θ , $\Delta\theta$ 。

由公式(1)、(2)可推出

$$k_{T1}\Delta w_1 \tan\theta + k_{N1}\Delta l_1 = F \quad (3)$$

当初始夹角为 θ 时,由菱形的几何性质可得

$$\begin{cases} \frac{w_{1o}}{2} = a \cos\theta \\ \frac{l_{1o}}{2} = a \sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

当变形量为 $\Delta\theta$ 时则有

$$\begin{cases} \frac{w'_{1o}}{2} = a \cos(\theta + \Delta\theta) \\ \frac{l'_{1o}}{2} = a \sin(\theta + \Delta\theta) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta w_1 = 2(\frac{w'_{1o}}{2} - \frac{w_{1o}}{2}) \\ \Delta l_1 = 2(\frac{l'_{1o}}{2} - \frac{l_{1o}}{2}) \end{cases} \quad (6)$$

由公式(6)可得

$$\Delta w_1 = -\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})\Delta l_1 \quad (7)$$

将公式(7)代入式(3),可得

$$\Delta l_1 = \frac{F}{-k_{T1}\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})\tan\theta + k_{N1}} \quad (8)$$

由公式(7)、(8)可得

$$\Delta w_1 = \frac{\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})F}{k_{T1}\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})\tan\theta - k_{N1}} \quad (9)$$

法线方向上总变形量为

$$\begin{aligned} \Delta L &= \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \sum_{i=1}^n \Delta l_1 q^{i-1} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{F q^{i-1}}{-k_{T1}\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})\tan\theta + k_{N1}} \end{aligned} \quad (10)$$

切线方向上第 N_i 个结构链的变形量为:

$$\Delta w_i = \Delta w_1 q^{i-1} = \frac{\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})F q^{i-1}}{k_{T1}\tan(\theta + \frac{\Delta\theta}{2})\tan\theta - k_{N1}} \quad (11)$$

其中,切向弹簧的弹性系数 k_{Ti} 是影响接触力与变形计算的关键。根据 Ojima 基于小波分析的方法可以从理论上证明: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_{Ti} 和第一个切向弹簧弹性系数呈指数倍关系^[13], 因而有

$$\frac{k_{Ti}}{k_{T1}} = e^{\frac{i-1}{\beta}} = \alpha_i \quad i = 2, 3, \dots, m; \alpha_i \geq 1 \quad (12)$$

根据等效关系,法线上第 N_i 个链上的 i 个弹簧的弹性系数假定是相同的,即

$$k_{N1} : k_{N2} : k_{N3} : \dots : k_{Nm} = 1 : 1 : 1 : \dots : 1 \quad (13)$$

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 $\lambda = \frac{\Delta\theta}{\theta}$, 当 $\lambda \leq 0.05$ 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。

2 虚拟触觉再现系统的实现

2.1 触觉再现系统

图3所示的触觉再现系统主要由触觉再现装置、触觉反馈、虚拟环境仿真等几部分组成。其中,触觉再现装置用来采集操作者的运动,并将由虚拟触觉模型计算的虚拟触觉反馈给操作者;虚拟环境仿真是在计算机内构建真实世界的物理模型。

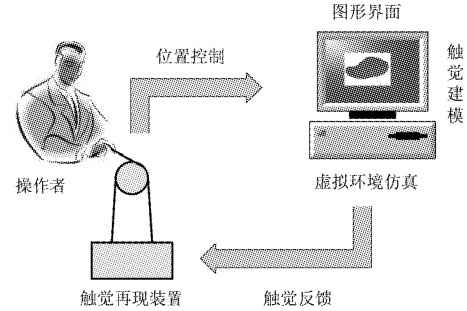


图3 触觉再现系统示意图

在该系统中,操作者通过触觉再现装置控制虚拟环境中虚拟手与虚拟柔性体间的相互作用,虚拟环境中的虚拟接触触觉又通过触觉再现装置反馈给操作者,使用户能真实地感知到虚拟柔性体的表面纹理、粗细、外形、位置、方向、温度、重量等特性。触觉再现系统的核心是:虚拟柔性物体的变形应尽可能与真实情况一致。

2.2 实验结果

系统采用VC++、OpenGL编程,在Inter(R) Core(TM)2 2.00GHz,2GB内存,NVIDIA GeForce 8400 GS显卡的PC机上实现了变形仿真,实验环境如图4所示。

通过手控器控制虚拟环境中虚拟探针的运动,本文采用的是瑞士 Force Dimension 公司提供的6DOF DELTA 力反馈手控器,其工作空间范围为平移

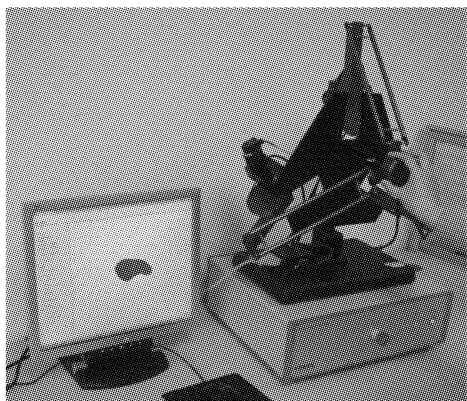


图 4 实验环境示意图

$\phi 360\text{mm} \times L300\text{mm}$ 和旋转 $\pm 20\text{deg}/\text{axis}$, 各个方向的最大力反馈为 20N。当人控制手控器在空间位置移动时, 这种空间位置的变化信号将被手控器上的位置传感器所检测, 用于驱动虚拟代理(虚拟手、虚拟探针等)。同时, 虚拟环境受力后产生的触觉信息将通过手控器反馈给操作者, 让操作者感觉到触觉信息的变化, 其原理简单, 易于操作。当虚拟探针与虚拟柔性体接触时, 根据本文提出的触觉变形模型, 模拟其变形。在实验中, 以 3116 个质点, 6228 个三角网格构成的虚拟肝脏为例来进行仿真模拟, 其变形前、后(压缩和拉伸)示意图分别如图 5、图 6 和图 7 所示, 变形量及变形区域的大小取决于施加外力的大小。

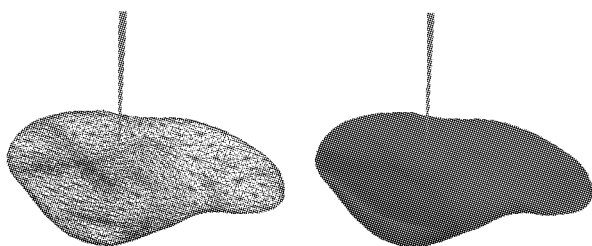


图 5 虚拟肝脏示意图

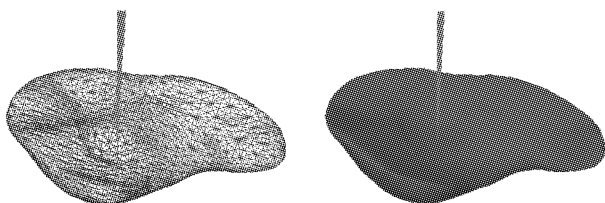


图 6 虚拟肝脏受压后受力变形示意图

在触觉再现系统中, 交互稳定性是确保高逼真度的首要指标, Colgate 等人的研究表明, 在触觉设备固有的阻尼特性一定的情况下, 提高作用力计算刷新频率可有利于确保系统的稳定性^[14]。根据本文

提出的触觉再现模型来模拟肝脏的变形, 完成一次图像刷新耗时 53ms, 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。

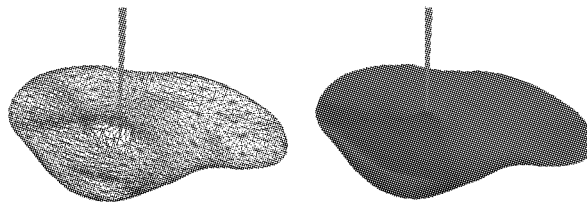


图 7 虚拟肝脏受拉后受力变形示意图

为了验证触觉变形模型的准确性, 采用文献[15]中所提出的图像边缘检测方法, 在相同接触力的情况下, 对柔性体受力变形进行了实际测量, 测量结果与模型推导得出的变形量基本吻合, 误差较小(图 8)。

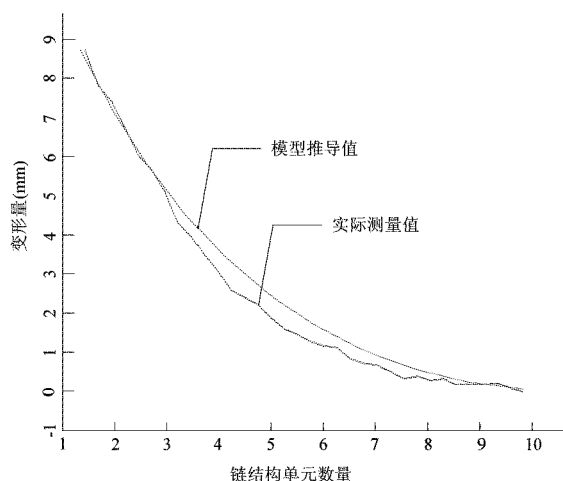


图 8 实际测量与模型推导计算的变形分布

3 结 论

本文针对虚拟现实系统的需要, 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。单元之间的链连接结构关系保证了当其中任意一个链结构单元被外力推拉时, 和它相连的链结构单元都同时产生相对位移及变形。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。在手控器上利用该模型对虚拟肝脏的触觉再现进行了仿真实验。

实验表明, 该模型对于柔性物体的触觉变形计算量小, 满足触觉再现反馈的实时性要求, 计算精度较高, 达到精细作业对虚拟现实系统的要求, 可将其应用于虚拟外科手术仿真、远程医疗等场合。当然,

该模型也存在着一定的局限性,今后要进一步完善的工作包括:将这种方法延伸到考虑柔性体的不均匀性、准不可压缩性,非线性-塑性-粘弹性等材料性质^[16],以模拟更为复杂、多样的人体软组织的受力变形。同时可将本文提出的算法和仿真系统的研究对象扩展到多用户与柔性物体接触的情况,以便获得更加逼真的变形模拟效果。

参考文献

- [1] Burdea G C. Haptics issues in virtual environments. In: Proceedings of Computer Graphics International 2000, Geneva, Switzerland, 2000. 295-302
- [2] Cavusoglu M C, Sherman A, Tendick F. Design of bilateral teleoperation controllers for haptic exploration and telemanipulation of soft environment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(4): 641-647
- [3] Popescu V G, Burdea G C, Bouzit M, et al. A virtual-reality-based telerehabilitation system with force feedback. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2000, 4(1): 45-51
- [4] Luciano C, Banerjee P, DeFanti T, et al. A framework for efficient and more realistic haptics applications. In: Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Chicago, USA, 2003. 1097-1103
- [5] Al-Yahmadi, Amer S, Hsia T C. Modeling and control of two manipulators handling a flexible beam. In: Proceedings of the 4th World Enformatika Conference, Istanbul, Turkey, 2005. 147-150
- [6] Cornella J, Suarez R. Fast and flexible determination of force-closure independent regions to grasp polygonal objects. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Turkey, 2005. 766-771
- [7] Ortega M, Redon S, Coquillart S. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(3): 458-468
- [8] Monserrat C, Meier U, Alcaniz M, et al. A new approach for the real-time simulation of tissue deformations in surgery simulation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2001, 64(2): 77-85
- [9] Suvranu De, Kim J, Lim Y J, et al. The point collocation-based method of finite spheres (PCMFS) for real time surgery simulation. *Computers and Structures*, 2005, 83(17): 1515-1525
- [10] Kim S Y. Medical simulation with haptic and graphic feedback. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4091: 171-178
- [11] Kim S Y, Kim K Y. Interactive racing game with graphic and haptic feedback. In: Proceeding of the 2nd International Workshop, HAID 2007, Seoul, Korea, 2007. 4813. 69-77
- [12] Costa I F, Balaniuk R. LEM-an approach for real-time physically based soft tissue simulation. In: Proceedings of the 2001 ICRA IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. 3. 2337-2343
- [13] Ojima H, Nagase K, Hayakawa Y. Wave-based analysis and wave control of damped mass-spring systems. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, USA, 2001. 3. 2574-2579
- [14] Colgate J E, Brown J M. Factors affecting the Z-Width of a haptic display. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, USA, 1994. 4. 3205-3210
- [15] 吴涓. 虚拟环境的力觉建模及力觉感知接口技术研究:[博士学位论文]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院, 2005
- [16] Gladilin E, Zachow S, Deuflhard P, et al. On constitutive modeling of soft tissue for the long-term prediction of cranio-maxillofacial surgery outcome. In: Proceedings of the 17th International Congress and Exhibition, London, UK, 2003. 343-348

A novel parallel rhombus-chain-connected model for haptic rendering

Zhang Xiaorui, Song Aiguo, Liu Jia*, Li Jianqing

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

(* Department of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract

To improve the accuracy and computation speed of virtual haptic rendering, a novel parallel rhombus-chain-connected haptic deformation model based on physics is proposed. Because the rhombuses in every chain structure unit are proportional in length, calculation cost is less and deformation modeling is easier for different soft objects using this model by only changing the length and angle of rhombus. 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. The results of the simulations on the contacting deformation and the real-time virtual haptic feedback of a soft object by using the delta haptic device show that the proposed method is suitable for the haptic feedback computation for a virtual deformation body, and can meet the operation requirements of virtual reality systems.

Key words: parallel rhombus-chain-connected model, haptic modeling, virtual reality