

触觉可视化技术中柔性物体变形模型研究

蔡 伟, 况迎辉

(东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 触觉可视化技术的出现开辟了虚拟现实技术新的应用前景, 柔性物体变形技术成为其中的研究热点。论文对触觉可视化技术中柔性物体变形技术进行深入研究, 系统地讨论了基于几何的力变形模型与基于物理意义力变形模型, 分析了相关模型的基本思想和优缺点, 对这些建模方法的性能进行了细致的比较。结果表明随着硬件技术的不断发展, 基于物理意义的有限元模型将会得到越来越多的应用。最后对柔性物体物理形变建模的未来发展趋势做了探讨。

关键词: 虚拟现实; 物体建模; 变形仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)03-0020-04

Research of Deformation of Soft Objects in Haptic Rendering

CAI Wei, KUANG Ying-hui

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

Abstract: The emergence of haptic rendering opens up the applications of virtual reality technology in which the deformation of soft objects has become the focus. The research of deformation of soft objects in haptic rendering which includes the geometric-based model and physically-based model are given in the paper. Also the advantage and disadvantage of these models are presented. Then, the comparison of these methods is carried out and the results show that the physically-based finite element model will be used more and more according to the development of the hardware technology. Finally, the future investigation of modeling is discussed in the paper.

Key words: virtual reality; object modeling; deformable simulation

0 引言

在触觉再现的虚拟仿真系统中, 主控端操作者借助触觉再现装置控制虚拟物体的同时, 能够实时地感受来自虚拟环境中的接触力作用。该系统主要模块包括触觉再现设备、操作者和虚拟环境构成三个部分(见图1)。

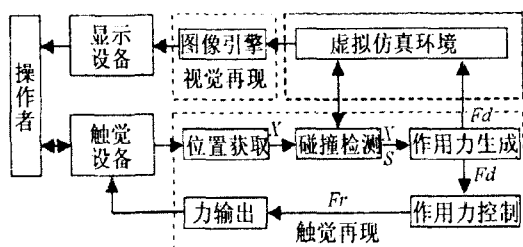


图1 虚拟触觉再现系统

虚拟触觉再现系统要让操作者感受到与真实环境中一致的真实力, 首先必须建立精确的三维模型。虚

拟环境中模型有两种: 一种是刚性物体, 即当施加外力时, 物体表面不发生变形; 另一种是柔性物体, 对于这种模型, 当施加外力时物体表面会发生变形^[1~3]。

对柔性物体的变形和接触力建模, 总体可以分为两大类: 一类是基于几何的力变形建模, 另一类是基于物理意义的力变形建模。基于几何的力变形建模方法, 是通过几何插值的方法直接改变物体表面的控制点从而改变物体形状, 接触力正比于物体的变形量^[4]。基于物理意义的力变形模型则从物理定律出发, 分析力和形变的关系^[5]。

文中介绍了几个典型的柔性物体变形建模方法, 包括基于正方形面片和三角形面片的几何模型, 基于直接构建的弹簧质点模型, 基于连续介质力学的有限元模型、边界元模型, 分析了各种建模方法的基本思想和优缺点及它们的典型应用, 并对这些模型的性能进行了对比, 对柔性物体建模的发展方向进行了探讨。

1 基于几何的力变形模型

虚拟力来源于虚拟物体间的相互接触, 因此, 研究物体变形首先要描述虚拟物体的三维造型和外观, 即

收稿日期: 2009-07-11; 修回日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60775057)

作者简介: 蔡 伟(1985-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为机器人传感与控制技术, 虚拟现实技术; 况迎辉, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机器人传感与控制技术, 虚拟现实技术。

要进行几何建模,几何建模是在虚拟现实建模技术中最先得到发展的。这类模型的建立比较简单,通过简单的几何图形构建物体模型。

1.1 基于正方形面片的三维模型

正方形面片(见图2)是一种较为简单的几何建模方法,正方形的优点是参数少,唯一的参数就是正方形的边长,在平面物体模型中有较大优势,比如在构造正方体模型、长方体模型等平面物体模型的表面时,用正方形面片就可以较为简单地实现。

正方形面片包含四个顶点,构建长方体模型时,四个顶点都在同一平面上,但当模型发生了变形,出现深度变化时,四个顶点就不在同一平面上,模型就会出现变形不对称的情况。

这样的不对称会使得模型产生的变形与实际情况不符,为了修正这种缺陷,出现了采用基于三角形面片的构造方法。

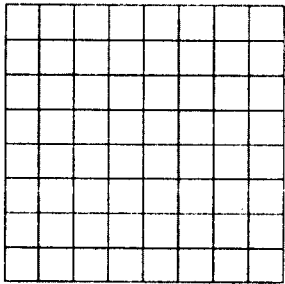


图2 正方形面片

1.2 基于三角形面片的三维模型

三角形面片(见图3)构造三维模型是应用最普遍的几何建模方法,三角形的优点就是三点确定一个平面,在对物体的变形和接触力建模时,只要计算得到三角形的三个顶点即可确定一个平面,而不论模型发生了什么样的变形。

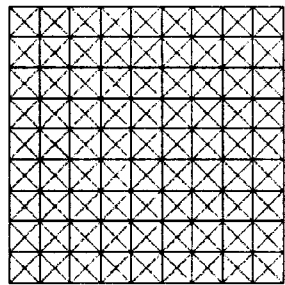


图3 三角形面片

使用三角形面片克服了一些正方形面片在模型需要发生形变时出现的不对称的情况。为了能让模型变形更加逼真,可以使三角形面片边长减小,面片数量增多,更加细化模型,这样在模型发生形变时,看上去更加逼真,由于变形时发生在上表面,因此在构建模型时,只需要将上表面细化成三角形面片,如图4所示。

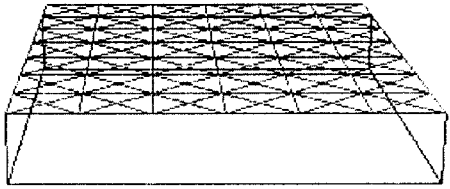


图4 三角形面片细化的长方体模型

2 基于物理意义的力变形模型

物理模型则基于物体的力学本构方程,通过相应的计算模型得出组织受力时的形变。与几何模型相比,物理模型能够更加真实地反映物体的形变过程。基于物理模型中,最常见的是弹簧—质点模型和有限元模型。

2.1 弹簧—质点模型

弹簧—质点模型通过离散的质点和连接它们的无质量弹簧(或阻尼器)网络来构建物体^[6]。因质点运动而产生的弹簧变形力通过胡克定理计算。弹簧网络的类型多种多样,如三角形、四边形或六边形,其中多个三角形网络可以构成一个六边形网络,如图5所示。

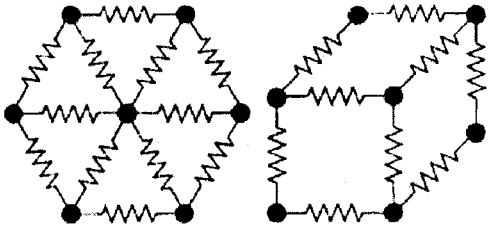


图5 弹簧质点模型中的网络模型

对于弹簧质点模型中任意一个质点*i*,其动力学特性可以用牛顿运动定律表示为:

$$m_i \ddot{x}_i + \beta_i \dot{x}_i + \sum_j g_{ij} = f_i \tag{1}$$

其中, m_i 是质点*i*的质量, x_i 是该质点当前坐标向量, β_i 是与其相连弹簧的阻尼系数, g_{ij} 是物体内部其他质点对质点*i*的作用力总和, f_i 是物体所受外部作用力在质点*i*上的分量。对于常用的线性弹簧,根据胡克定律,质点*i*和质点*j*之间的弹簧施加给*i*的弹性力为:

$$g_{ij} = k_{ij} (|x_{ij}| - l_{ij}) \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \tag{2}$$

其中, k_{ij} 为质点*i*和质点*j*之间弹簧的刚度系数, $|x_{ij}|$ 是两个质点的位置向量之差($x_j - x_i$), l_{ij} 是它们之间的初始距离。通过将所有质点的运动方程联合起来就可以获得物体的运动模型。

弹簧质点模型的优点在于首先由于它不需要连续参数化,因此易于实现,其次弹簧—质点模型既可以用于动态分析也可以用于静态分析。由于它的网络构建的直观性和简单性,以及相应联合方程组的易于求解性,因此,可以方便地仿真物体的大变形以及切割或撕

裂等行为。然而,弹簧—质点模型也存在不足之处:首先,弹簧—质点模型是不收敛的,即随着模型网格的不断细化,对模型求解所得到的结果并不收敛到问题的精确解;再次,由于弹簧系数设定的任意性,导致所仿真物体行为特性的优劣较难定量地鉴别;最后,弹簧—质点模型的局部相关性导致在变形较大时不能准确描述组织的变形^[6]。

2.2 有限元模型

有限元模型是一种连续参数化模型,它将组织离散为若干子单元,并通过它们边界上的结点相互联结成为组合体,用每个单元内所假设的近似函数来分片地表示求解域内待求的未知应变量,通过和原问题数学模型(基本方程、边界条件)等效的变分原理或加权余量法,建立求解基本未知量(场函数的结点值)的代数方程组或常微分方程组。以位移作为未知量为例,每个单元内部或边界上任一处的位移都可以通过该单元的节点位移值来插值确定(即位移函数)^[7]。单元节点或单元边界的共用性决定了位移在各单元之间的连续性。这样,可以获得代数方程形式的系统动力学平衡方程:

$$\ddot{MX} + \dot{DX} + KX = F \quad (3)$$

其中, M 、 D 和 K 是物体相应的质量、阻尼和刚度矩阵, F 是所有外力的合成向量, X 为节点位移。根据相应的边界条件求解出各单元节点的位移,然后通过位移函数获得任意点的位移量。

有限元算法的计算量较大,因此,在实际应用时需要进行简化。Sascha^[8]利用快速有限元算法(Fast Finite Element Model, FFEM)实现颈部手术导航。Chai^[9]研究了混合静力凝聚有限元技术,对内部及小变形区域的自由度进行了凝聚,从而大大减小了计算量。Bro—Nielsen^[10,11]应用浓缩法(FEM)来进行实时仿真,Berkley等^[12]基于浓缩法建立了虚拟缝合仿真系统。

与弹簧—质点模型相比,有限元模型的优点是仿真精度和真实度较高,但是因为复杂程度较高,计算量较大,所以难以做到实时仿真。不过随着研究的深入以及计算机硬件条件的不断升级,有限元模型的计算

效率得到了有效的提高,人们开始越来越多地采用有限元模型作为计算模型。

2.3 边界元模型

边界元模型(boundary element models,简称为BEM)与浓缩法FEM有类似的地方,即都对物体进行离散,但不同的是BEM只对模型的边界进行离散,降低了问题的维数,减少自由度的数目,简化了计算。通过Green—Gauss定理将微分动力学方程转化为边界积分的形式,使得未知量仅处于物体的边界上,所以边界元法中无需考虑内部结点位移。

相对FEM而言,BEM中的系统方程规模较小,因而更适合于实时仿真。Monserrat等^[13]在文章“手术仿真中组织变形实时仿真新方法”里详细介绍了BEM方法。BEM方法的缺点是它一般仅适用各向同性材料的物体。此外,BEM与FEM同样基于线性弹性理论,因而也不适用于仿真物体的全局大形变。

3 结束语

以上所述的模型都有各自的优点和不足,并不能兼顾触觉再现系统中柔性物体建模需要的所有特性。为了对各种模型有个更直观的认识,从计算快速性、计算稳健性、仿真精确性、拓扑灵活性以及大形变等方面对各种建模方法进行了一个比较,如表1所示,表1中,* * *表示性能优,*表示性能差。

由表1可以看出,在对物体进行建模时,模型的计算速度与仿真精度是一对矛盾。如基于几何的力变形模型,它的计算速度最快,但是仿真精度却是最低的。而有限元模型虽然有较高的仿真精度,但其却需要较多的计算时间。因此在触觉可视化技术中,一般要从具体的性能侧重点出发选择所需要的模型。

对于基于几何的建模方法来说,它的仿真精度远低于其它模型,有时会出现失真现象,因此现在已经很少使用。对于弹簧—质点模型,由于其简单直观以及所对应的系统方程组易于求解,因此在对仿真精度要求不高的场合下得到了较为广泛的运用。然而,此类建模方法已经逐渐发展完善,其可提升改进的空间已经很小。

表1 各种建模方法性能比较

模型类别		计算快速性	计算稳健性	仿真精确性	拓扑灵活性	大形变
几何模型	三角形面片模型	* * * *	*	*	* * * *	*
	正方形面片模型	* * * *	*	*	* * * *	*
物理模型	弹簧—质点模型	* *	*	* *	* * * *	*
	有限元模型	*	* * * *	* * * *	*	*
	边界元模型	* * *	* * *	* * *	* * *	* *

随着计算机硬件技术的发展,特别是随着 GPU 技术的发展,由于 GPU 与 CPU 相比具有处理浮点运算上的天然优势^[14],可以将一部分计算放入 GPU 中进行,大大提高了计算的速度。对于有限元模型和边界元模型而言,它们目前所存在的计算速度慢的不利因素将会得到改善。而它们具有仿真精度高的优点,所以这类模型将会越来越多地应用于触觉再现中柔性物体物理形变建模。

参考文献:

[1] Burdea G C,Coiffet P.虚拟现实技术[M].第 2 版.魏迎梅,栾悉道译.北京:电子工业出版社,2005.

[2] Yan Zhuang,John C. Haptic interaction with global deformations[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE Conference Proceedings, 2000:2428-2433.

[3] 陆 熊,宋爱国.力/触觉再现虚拟现实系统的实现方法研究[J].工业仪表与自动化装置,2008(1):75-78.

[4] Salisbury K,Barbagli F,Conti F. Haptic rendering:introductory concepts[J]. IEEE Computer Graphics and Applications Magazine,special issue on Haptic Rendering,2004,20(2):24-32.

[5] 潘振宽,高 波.手术仿真中基于质点-弹簧模型的人体组织变形仿真[J].青岛大学学报,2003,18(3):9-14.

[6] 王 征.虚拟手术中的软组织形变仿真算法研究[D].南

京:东南大学,2006.

[7] Zienkiewicz O C,Talyer R L. The finite element method:Volume 1 the basis[M]. 5th ed. Oxford:Butterworth Heinemann, 2000.

[8] Sascha S,Oliver B. Deformable modeling of the cervical spine for neurosurgical navigation[C]//International Congress Series. Amsterdam:Elsevier B. V. ,2004:455-460.

[9] Chai J Y,Sun J. Hybrid FEM for deformation of soft tissues in surgery simulation[C]//Medical Imaging and Augmented Reality. Washington,DC: IEEE Computer Society,2001:298-303.

[10] Bro-Nielsen M. Fast finite elements for surgery simulation [C]//Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality. San Diego:[s. n.],1997:395-400.

[11] Bro-Nielsen M. Finite element modeling in surgical simulation[J].Proceedings of the IEEE,1998,86(3):490-503.

[12] Berkley J,Turkiyyah G,Berg D. 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.

[13] Monserrat C,Meier U,Alcaniz M. A new approach for the real-time simulation of soft tissue deformation in surgery simulation[J]. Computer Methods and programs in Biomedicine, 2001,64(20):77-85.

[14] 吴恩华,柳有权.基于图形处理器(GPU)的通用计算[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,16(5):601-612.

(上接第 19 页)

下,提供了一种 SVM 文本分类的解决途径。

下一步的研究计划选用网络文档数据代替当前所选用的标准测试文本集进行测试,评估该方法在实际应用中的可靠性。

表 2 在不同特征数和稀疏度下,分类效果对比

	稀疏度	特征数	宏平均 F1
完备训练集	59.7384	15000	0.6520
	51.2784	10000	0.6515
	39.0897	5000	0.6437
	30.6813	3000	0.6346
采样训练集	67.2874	15000	0.6466
	52.3617	10000	0.6377
	39.3666	5000	0.6247
	30.9498	3000	0.6152

参考文献:

[1] 孙晋文,肖建国.自动文本分类中的智能处理技术[J].计算机科学,2003,30(8):18-20.

[2] 刘丽珍,宋瀚涛.文本分类中的特征提取[J].计算机工程, 2004,30(4):14-15.

[3] Joachims T. Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features[C]//In European Conference on Machine Learning (ECML). Chemnitz, Germany:[s. n.],1998:137-142.

[4] 刁 倩,张惠惠.文本自动分类中的词权重与分类算法[J].中文信息学报,2000,14(3):25-29.

[5] Gartner T,Flach P A. WBC_{sm} Weighted Bayesian Classification based on support vector machine[C]//18th Int. Conf. on Machine Learning. Willianstown, USA:[s. n.],2001:154-161.

[6] Sindhawani V,Pushpak B,Subrata R. Information Theoretic Feature Crediting in Multiclass Support Vector Machine[C]// 1st SIAM Int. Conf. on Data Mining. Chicago, IL, USA:[s. n.],2001:1-18.

[7] Lewis D D,Yang Y,Rose T,et al. RCV1: A New Benchmark Collection for Text Categorization Research[J]. Journal of Machine Learning Research,2004(5):361-397.

[8] 任纪生,王作英.基于特征有序对量化表示的文本分类方法[J].清华大学学报,2006,46(4):527-530.

[9] 庞剑锋,卜东波.基于向量空模型的文本自动分类系统的研究与实现[J].计算机应用研究,2001,18(9):23-27.