[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.02.010

# 力触觉建模及再现技术研究

秦 伟,杭鲁滨*,黄晓波,付志宇,陆九如

(上海工程技术大学 机械工程学院,上海 201620)

**摘 要**:力触觉再现关键技术之一是物理模型和碰撞检测算法的构建。以7自由度力触觉设备为基本构架,介绍了力触觉设备的反馈机理和电气组成;分析比较了力触觉建模的特点,研究弹簧-质点模型,给出了弹簧-质点模型的面模型和体模型的具体表现形式;分析了力触觉再现碰撞检测算法的优劣,实现了AABB包围盒的遍历算法。最后在Chai 3D环境构建一个操作手与虚拟柱体的力触觉交互反馈模型,分析了在3种交互情况下的反馈力情况。本文可为力触觉再现技术的深入研究提供理论参考。

**关 键 词**:力触觉再现;力反馈;弹簧-质点模型;碰撞检测

**中图分类号**:TP391.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2017)02-0048-05

## Haptic Model Theory and Rendering Technology

QIN Wei, HANG Lubin*, HUANG Xiaobo, FU Zhiyu, LU Jiuru

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract**: Physical model and collision detection algorithm are the key to the haptic rendering. The 7 dof haptic device was taken as example to introduce the feedback mechanism and electrical structure of haptic device. The haptic modeling method was analyzed and compared. The spring-mass model was introduced, and the plane structure model and solid model of spring-mass model was given. The advantages and disadvantages of the haptic rendering were analyzed, and the traversal algorithm of AABB method was proposed. The haptic interaction model of operation tool and virtual cylinder was set up in Chai 3D. The force feedback situation was analyzed to provide the theoretical basis for the research of haptic rendering.

**Keywords**: haptic rendering; force feedback; spring-mass model; collision detection

大量研究结果表明,在人类获取及处理信息的过程中,触觉是除视觉与听觉之外最重要的感官,当操作机械臂进行与环境相互作用时,比如组装工件、插销入孔等,如果仅仅提供视觉图像信息,操作者无法从中获得真实的感受[1]。2002年Ernst在《nature》中指出人的视觉偏差直接依赖于力/触觉信息的修正[2]。遥操作和虚拟操作的研究还表明,触觉信息的反馈可以极大提高精细作业任务的效率和精度,如对插销入孔操作的对比实验表明,给操作者提供力/触觉反馈信息比仅有图像显示可使操作者完成任务的时间缩短近一半[3]。

基于临场感技术[4]及触觉再现技术[5]的力反馈交互装置具有力反馈功能,能够将机器人所接触物体的外形轮廓与触觉特征真实地再现给操作者[6],并可让操作者感知虚拟环境中物体运动、力觉交互,从而让操作者对自身的操作进行更好地修正[7-8]。

本课题组以7自由度力触觉设备为研究对象,分析了力触觉设备的反馈机理与机构的电气组成。通过对虚拟物体的力触觉建模方法进行分析比较,着重介绍了弹簧-质点模型,并对力触觉建模中的碰撞检测问题进行讨论,给出AABB包围盒遍历算法的流程图;最后在Chai 3D环境中构建一个操作手与虚拟柱体的力

**收稿日期**:2016-11-09;**修回日期**:2016-12-16

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(NFS51475050);上海市科学技术委员会重点支撑项目(12510501100);上海工程技术大学技术设备研发课题《并联机器人力触觉装置研究》(J(15)JX-008)。

**第一作者简介**:秦伟(1990),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为机器人机构学、现代机构学。通信作者:杭鲁滨(1965),男,江苏南京人,博士,教授,主要研究方向为机器人机构学、现代机构学。E-mail:hanglb@126.com

触觉交互反馈模型,分析了在3种交互情况下的反馈力情况。

## 1　力反馈设备的反馈机理与电气组成

### 1.1　力反馈设备的机理

力反馈设备的研究始于20世纪中期,并随着材料科学、电子信息科学以及机器人学理论的快速发展而得以实现。图1所示为应用广泛的具有7自由度的Omega.7并联机构力反馈设备。

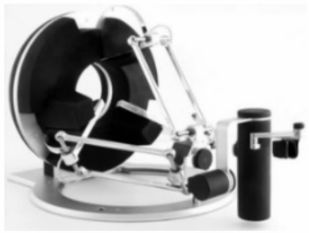


图1　7自由度力反馈设备

Figure 1　Force feedback device with 7 DOF

力触觉设备结构及控制系统是力触觉再现技术得以实现的核心,是力触觉研究的重点。如图2所示,力触觉设备再现的实现思路是:当操作者操纵手柄来控制虚拟环境中的工具与环境中的虚拟物进行交互作用时,受力手柄也会产生相应的反作用力。为使这种反馈作用可达到一定的精度,需要计算机系统对输入量进行处理并反馈补偿[9]。操作者既可通过操作手柄感受反馈力,又可通过PC端的显示器来对虚拟环境进行观测。

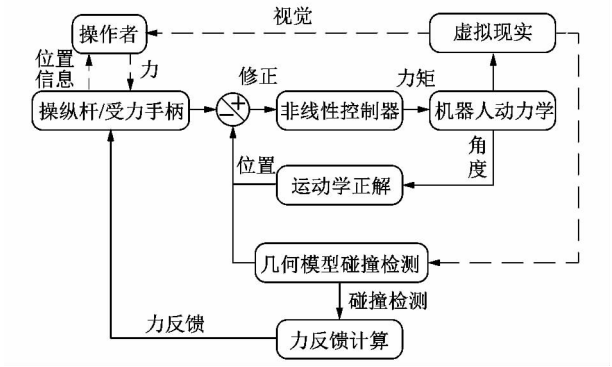



图2　力触觉再现的原理图

Figure 2　Schematic diagram of haptic rendering

### 1.2　力反馈设备的电气构造

如图3所示,以7自由度并联机构力反馈设备为例,完整的力反馈设备包括有相应的数据采集模块、电机驱动器以及与电机配套的编码器,并且为实现力触觉再现,还需为力触觉设备提供与计算机相连的通信通道[10]。

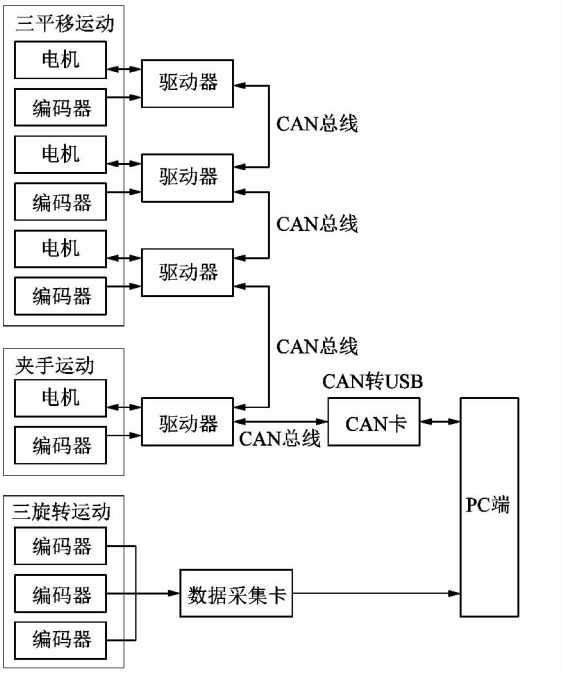



图3　7自由度力反馈设备的电气组成

Figure 3　Electrical components of 7 dof force feedback equipment

## 2　虚拟物体的力触觉建模

### 2.1　虚拟物体力反馈模型的实现

虚拟环境中,施加于虚拟物体上的外力使得虚拟物体发生形变,如图4所示。其本质是施加于虚拟质点上的外力造成虚拟物体产生接触形变。

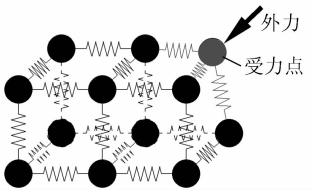



图4　基于弹簧-质点模型的虚拟物体接触模型

Figure 4　Virtual object contact model based on spring-mass model

如图5所示,当操作者通过末端执行器控制小球与利用弹簧-质点模型建立的虚拟薄膜进行交互作用时,采用合适的力触觉反馈计算模型即可虚拟薄膜发生的接触形变转变为操作者可以感受的反作用力[11]。

### 2.2　力触觉反馈研究特点

虚拟现实环境中虚拟物体的力触觉建模及再现技术研究是一大研究热点,其难度主要体现在以下几方面[12]:

1)虚拟物体建模精度与碰撞检测的实时性难以平衡。

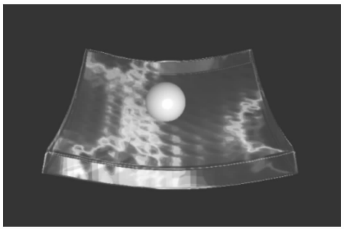


图 5 小球与薄膜发生交互作用时的形变示意图

Figure 5 Deformation sketch map of virtual small ball and membrane

2)难以建立稳定、可靠、简便的物理模型。

3) 虚拟现实设备性能的局限性。

### 2.3 弹簧-质点模型

虚拟环境中的物体碰撞力反馈模型建立的优劣直接关系到碰撞检测的实时性及精确性。目前,虚拟物体碰撞的力反馈建模可分为 2 大类:①基于几何形变的建模;②基于物理意义的建模。前者采用纯几何的方法进行建模,可真实反应物体的结构特征;后者可更好反应虚拟物体的运动学、动力学特征,常应用于现实世界的仿真及三维医学图像可视化领域。

目前,常用的力触觉模型包括:有限元模型、3D ChainMail、弹簧-质点模型[13]等。各建模方法的优劣情况如表 1 所示。

表 1 几种建模方法的比较

Table 1 Comparison of several modeling methods

| 建模方法 | 复杂性 | 计算精度 | 鲁棒性 | 实时性 |
|---|---|---|---|---|
| 有限元法 | 复杂 | 高 | 较好 | 一般 |
| 3D ChainMail | 简单 | 较低 | 差 | 好 |
| 弹簧-质点法 | 简单 | 一般 | 一般 | 好 |

其中,弹簧-质点模型是最早提出的一种物理形变模型。该模型将虚拟物体视作由一系列质点及连接各个质点的具有阻尼的弹簧组成。

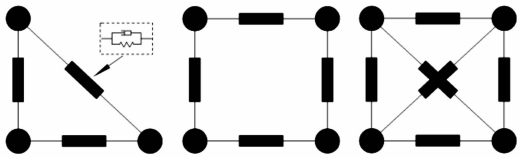
按虚拟物体的机构特征的不同,弹簧-质点模型可分为面模型、体模型。面模型的拓扑结构如图 6 所示,其中图 6(a)、6(b)分别对应三角形、四边形的平面拓扑结构,图 6(c)为由三角形、四边形的平面拓扑结构共同组成的复杂面模型[14]。

体模型是指具有空间结构的弹簧-质点模型,适用于具有生物力学特性的虚拟柔性物体建模。此模型的拓扑结构相较于面模型显得更复杂,碰撞过程的形变计算量较大。图 7 中(a)、(b)和(c)为 3 种常见体模型结构:四面体、六面体以及由四面体六面体共同组成的复杂立体模型[15]。

在所建立的虚拟环境中,牛顿第二定律适用于采用弹簧-质点模型所构造的虚拟物体中的每个质点的运动。对于第 $i$ 个虚拟质点,其变形量与所受外力之间具有如下的关系:

$$f_i = -Cx_i + \sum_{j=1}^{n} K_i x_{ij} + m_i g + m_i x_i 。$$

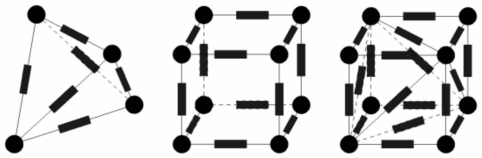
式中:$m_i$ 表示质点 $i$ 的质量;$x_i$ 表示第 $i$ 质点的位移向量;$x_{ij}$表示两质点的相对位移;$C$ 表示阻尼系数;$K_i$ 表示弹性系数;$f_i$ 表示质点 $i$ 所受到的外力。



(a) 三角形结构 (b) 四边形结构 (c) 复杂面模型

图 6 弹簧-质点面模型拓扑结构

Figure 6 Plane structure model of spring-mass model



(a) 四面体 (b) 六面体 (c) 复杂结构

图 7 弹簧-质点体模型拓扑结构

Figure 7 Solid structure model of spring-mass model

## 3 虚拟物体力触觉再现的碰撞检测

利用合适的建模方法建立了虚拟物体后,还需对虚拟环境中物体发生交互作用的时机进行判断检测。实时碰撞检测算法主要归为 2 类:层次包围盒法[16]和空间分割法[17],其中层次包围盒法应用更为广泛。

### 3.1 层次包围盒法

层次包围盒方法是利用具有简单几何特征的平面或立体包围盒来对复杂的几何对象进行包络,将复杂的对象进行简化,从而仅需对简化后的包围盒进行相交性分析。该方法可大大简化力触觉再现中碰撞检测的难度及计算量,提升了仿真的速度及力反馈的实时性。层次包围盒方法在使用时的判定依据包括:构造难度、模型数据存储量、模型复杂度、建模的紧密度、虚拟物体旋转时的模型更新计算量以及建模方法的适用性等。

典型的层次包围盒方法主要包括 AABB、包围球、OBB 以及 $k$-dops 法,这几种典型方法的优缺点对比如表 2 所示。

表 2　几种典型的层级包围盒方法

Table 2　Several typical bounding box methods

| 方法 | AABB | 包围球 | OBB | $k$-dops |
|---|---|---|---|---|
| 构造难度 | 低 | 低 | 较大 | 较大 |
| 存储量 | 较小 | 小 | 一般 | 随 $k$ 变化 |
| 复杂度 | 简单 | 简单 | 较复杂 | 简单 |
| 紧密度 | 较差 | 差 | 好 | 好 |
| 计算量 | 较小 | 不需要 | 较小 | 较大 |
| 适用性 | 好 | 差 | 差 | 较好 |

### 3.2　碰撞检测的算法实现

AABB(沿坐标轴包围盒)指通过构造一个可包含该虚拟物体的最小长方体来实现对模型的简化,该长方体的边平行于空间坐标系的 3 个坐标轴。如图 8 所示,AABB 在构造力触觉模型时,仅需通过比较物体各个顶点的 $x$,$y$ 和 $z$ 坐标的最大值和最小值,并以此构造出符合需求的长方体[18]。计算一个虚拟物体的 AABB 仅需 $6p$ 次比较运算,其中 $p$ 为虚拟物体的顶点数。

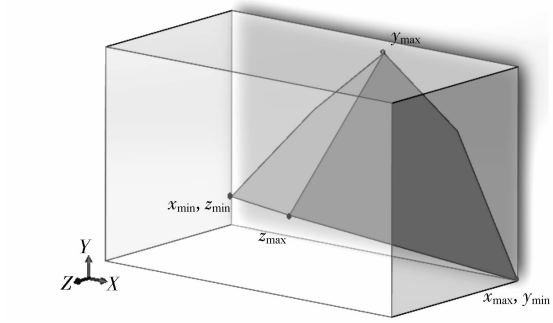



图 8　AABB 构造虚拟物体

Figure 8　Virtual objects constructed by AABB method

建立完各虚拟物体的 AABB 包围盒后,接下来即是要对这些包围盒进行遍历算法搜索,找出其中有可能发生碰撞的包围盒。对任意 2 个 AABB 包围盒 $V_i$ 和 $V_{(i+k)}(i,k=1,2,\cdots,n)$,其遍历 AABB 包围盒的算法可通过如图 9 所示的算法流程图实现。

通过 AABB 包围盒遍历算法,可对任意 2 个虚拟物体的包围盒进行碰撞检测分析,得到两物体间可能存在碰撞相交的位置及范围,并可快速排除不相交部分,减少碰撞检测的运算量,提高检测效率。

## 4　力触觉反馈的实验案例实现

基于上述建模方法和碰撞检测方法,在 Chai 3D 环境中构造一个虚拟碰撞试验系统,来对力触觉反馈进行实践验证。

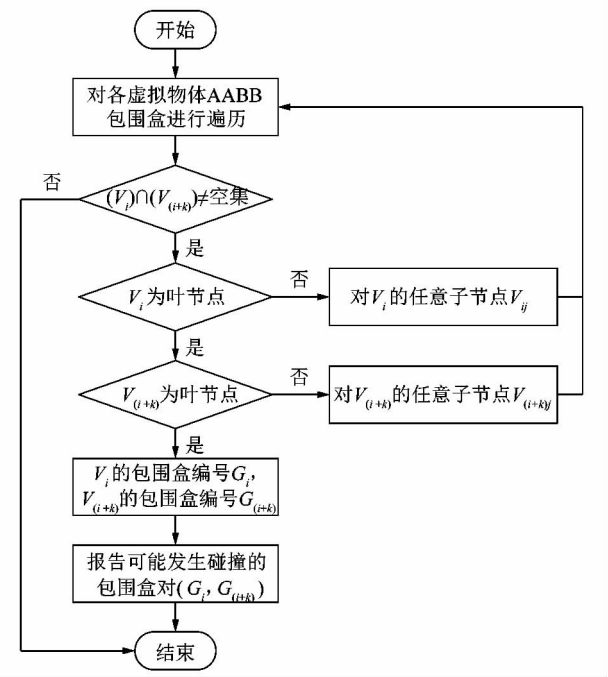
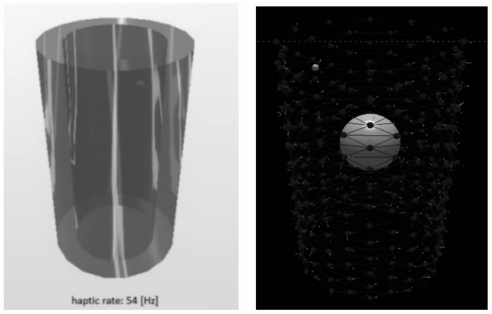



图 9　AABB 遍历算法的流程图

Figure 9　Traversal algorithm flow chart of AABB method

### 4.1　力反馈控制系统搭建

利用 3ds MAX 软件创建具有通孔特征的圆柱体,将其导入由触觉渲染引擎 Chai 3D、力触觉反馈设备 Omega.7 及配套 SDK 软件开发包以及 Visual Studio 2008 共同构建的虚拟环境中,并利用弹簧-质点模型对虚拟圆柱体加以重构,构造出如图 10 所示的虚拟弹性圆柱模型,并以球体弹簧构造虚拟环境中的柔性弹性圆柱。




(a) 虚拟圆柱模型　　(b) 具有弹簧质点结构的圆柱

图 10　虚拟环境中的柔性弹性圆柱

Figure 10　Flexible elastic cylinder in virtual environment

将具有通孔特征的虚拟弹性圆柱模型与力反馈设备提供的虚拟操作手在虚拟环境中进行交互,此时操作者既可通过视觉对虚拟环境中的交互情况进行观

察,也可通过力触觉设备的操作末端反馈力对交互情况进行体验,并根据需要进行虚拟操作手位姿的调整。在如图 11 所示的 Chai 3D 虚拟环境中,当虚拟操作手与圆柱模型发生交互碰撞时,力可以反馈给操作者,让操作者更好地感受并控制虚拟操作手的运动。

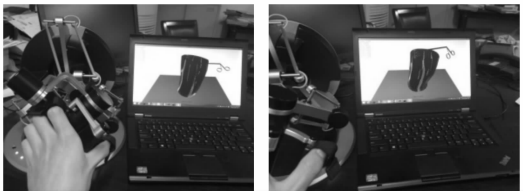
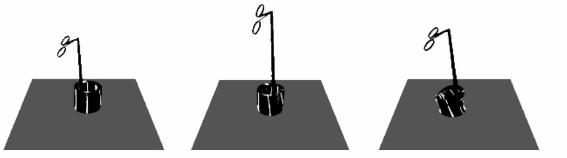


图 11 虚拟操作手与圆柱的交互操作实验

Figure 11 Interactive operation experiment between virtual tool and cylinder

### 4.1 实验分析

在上述力触觉再现交互实验中,操作手运动的快慢、施加力的大小及角度均会对力触觉交互仿真结果造成重要的影响。图 12(a)、(b)、(c)分别表示虚拟操作手与圆柱模型之间无交互、缓慢交互、以一定速度角度发生交互时,圆柱模型的形态变化。



(a) 无交互接触 (b) 缓慢交互 (c) 一定速度下的交互

图 12 3 种情况下操作手与圆柱间的交互作用

Figure 12 Interaction between operation tool and cylinder in three different conditions

通过力触觉再现仿真实验,可发现:

1) 虚拟操作手与圆柱模型之间发生交互作用时,反馈力的大小在 ±5% 范围内浮动;

2) 当虚拟操作手与圆柱模型中部发生交互力作用超过虚拟体综合刚度时,反馈的力的大小将会发生突变,导致圆柱模型发生不可预测的形变,这是因为我们所构造的力触觉反馈算法的力存在特定点力范围限制的缺陷;

3) 通过设定接触力超限报警算法构造,修正该突变特性。

## 5 结论

1) 分析了 7 自由度力触觉装置的反馈原理,并给出相应的电气控制原理分析图。

2) 比较了力触觉建模方法的优劣,着重研究了弹簧-质点模型,并给出了 AABB 包围盒的遍历算法流程图。

3) 在 Chai 3D 环境中搭建力触觉反馈模型,对 3 种情况下的力反馈情况进行分析,并给出接触情况的实验结果分析,并提出需要力范围大小的预警。为后续的力触觉再现系统的搭建提供思路。

**参考文献:**


[1] 王爱民,戴金桥. 人机交互中的力/触觉设备进展综述[J]. 工业仪表与自动化装置,2007(2):14 - 18.

[2] ERNST M O, BANKS M S. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion[J]. Nature, 2002, 415(6870):429 - 433.

[3] CUI Zhenglie, MATSUNAGA K, SHIDOJI K. The effect of reaction force feedback on object-insert work in virtual reality environment [J]. Researeh reports on information scienee and eleetrleal engineeringv of Kyushu university, 2002, 7(2):105 - 110.

[4] SATAVA R M. Robotics, telepresence and virtual reality: a critical analysis of the future of surgery[J]. Minimally invasive therapy, 1992, 1(6):357 - 363.

[5] HASSER C J, DANIELS M W. Tactile feedback with adaptive controller for a force-reflecting haptic display: 1 design [C]// Proceedings of the 1996 Fifteenth Southern Biomedical Engineering Conference. Dayton, Ohio: IEEE, 1996:526 - 529.

[6] 宋爱国. 人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究[J]. 科技导报,2015,33(23):100 - 109.

[7] 陆九如,杭鲁滨,黄晓波,等. 基于虚拟现实的力反馈交互系统应用技术[J]. 轻工机械,2016,34(2):98 - 102.

[8] 付志宇. 力触觉反馈系统的虚拟现实应用研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2014:2 - 3.

[9] 周丽媛. 虚拟手术中基于无网格下触觉反馈算法的研究[D]. 南昌:南昌大学,2012:3 - 6.

[10] 陆九如. 基于并联机构的力触觉反馈系统机理研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2015:59 - 60.

[11] FERZLI G S, FINGERHUT A. Trocar placement for laparoscopic abdominal procedures: a simple standardized method[J]. Journal of American college of surgeons, 2004, 198(1):163 - 173.

[12] 张小瑞,宋爱国,刘佳,等. 虚拟物体的力/触觉模型及再现技术研究进展[J]. 系统仿真学报,2009,21(15):4555 - 4560.

[13] PLATT S M, BADLER N L. Animating facial expressions [J]. ACM siggraph computer graphics, 1981, 15(3):245 - 252.

[14] MURRAY R M, LI Z X, SASTRY S S, et al. A mathematical introduction to robotic manipulation [M]. Florida: CRC Press, 1994.

[15] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[16] 朱元峰,孟军,谢光华,等. 基于复合层次包围盒的实时碰撞检测研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(2):372 - 377.

[17] 邹益胜,丁国富,许明恒,等. 实时碰撞检测算法综述[J]. 计算机应用研究,2008,25(1):8 - 12.

[18] 邹益胜. 虚拟样机环境下实时碰撞检测算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2009:3 - 5.