

文章编号: 1002-0446(2004)02-0107-04

# 虚拟环境中灵巧手主从抓持的实现\*

刘杰, 张玉茹

(北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083)

**摘要:** 研究了虚拟现实环境中人手和灵巧手的抓持动作, 利用数据手套采集人手的运动信息, 将人手的运动映射给灵巧手, 通过搭建人手和灵巧手的模型, 在虚拟环境下实现了主从抓持操作, 探讨了关键技术问题: 异构系统运动映射、碰撞检测、虚拟力建模、稳定抓持的判据。

**关键词:** 虚拟环境; 灵巧手; 抓持

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## Master/ Slave Grasping of Dexterous Robotic Hands in Virtual Reality

LIU Jie, ZHANG Yu-ru

(Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper describes the grasping of human hand and dexterous hand in virtual environment. We capture the motion information of human hand using Dataglove, map human hand motion to dexterous hand. The master/slave grasping is realized in virtual environment by forming the 3D model of human hand and dexterous hand, and several key technologies in establishing a virtual grasp system, such as motion mapping, collision detection, virtual force mode, criterion of robust grasp, are discussed.

**Keywords:** virtual environment; dexterous hand; grasping

### 1 引言 (Introduction)

机器人多指灵巧手的主要功能是抓持和操作物体。抓持是操作的基础, 根据抓持任务确定灵巧手各关节转角和各关节力矩, 即抓持规划, 是灵巧手应用中一个非常重要而尚未完全解决的问题。解决抓持规划问题有两种常用方法: 经验法和分析法, 二者各有优缺点。美国航空航天局所属 JPL 实验室的 B. Jau<sup>[1]</sup> 和德国宇航研究中心的 M. Fischer<sup>[2]</sup> 采用经验法实现抓持规划。本文采用经验法主从操作策略, 充分发挥人手的灵活性, 控制虚拟环境中的灵巧手, 完成抓持任务。在虚拟环境中搭建人手和灵巧手的运动模型, 利用数据手套获得人手的运动数据, 通过运动映射算法控制虚拟环境中的人手和灵巧手, 实现与人手类似的动作, 借助虚拟现实技术, 建立了一个方便自然的人机接口, 实现了虚拟环境中的主从抓持, 为分析人手和机器人手的抓持动作提供了一个

良好的试验环境。

### 2 系统的功能和结构 (Function and structure of the system)

建立本系统的目标是在虚拟环境中完成主从抓持, 在抓持过程中检验规划系统中的各个技术环节, 检验灵巧手对不同形状、大小的物体的抓持能力。

系统的结构在硬件上包括数据手套和 PC 机, 软件上按照功能划分为: 人手运动检测、人手到灵巧手的运动映射、碰撞检测、虚拟力计算、碰撞响应、图形显示等模块。软件的体系结构如图 1 所示, 虚拟抓持的主要流程如图 2 所示。

试验时, 操作者佩戴经过标定的数据手套来完成人机交互, 用人手的运动数据来驱动虚拟环境中的人手和灵巧手模型完成抓持动作。手与物体接触产生的虚拟接触力可以通过数据手套上的力反馈装置反馈给操作者来增强虚拟抓持的真实感。系统中

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59985001); 国家教育部博士点基金资助项目(2000000605)。  
收稿日期: 2003 - 07 - 02

对灵巧手、人手和物体的抓持采用了不同的实现方法:碰撞检测和碰撞响应方法.对灵巧手而言,通过碰撞检测确定手与物体的接触关系,再通过识别手的不同位姿,结合接触点的位置关系,判断是否是稳定抓持,实现抓取物体.

本文对手采用动力学分析的方法,在虚拟环境中通过碰撞检测计算手与物体的接触部位,对物体进行受力分析和运动分析,确定手与物体之间的相互运动关系.

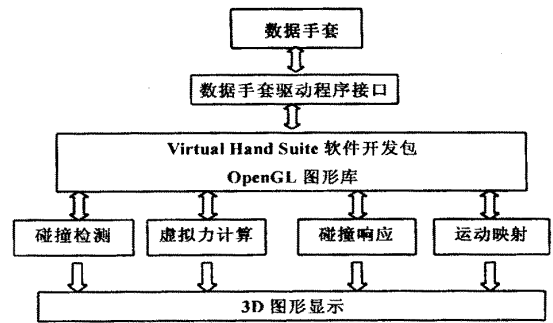


图1 虚拟主从操作软件体系结构

Fig.1 Diagram of software architecture for virtual master/slave manipulation

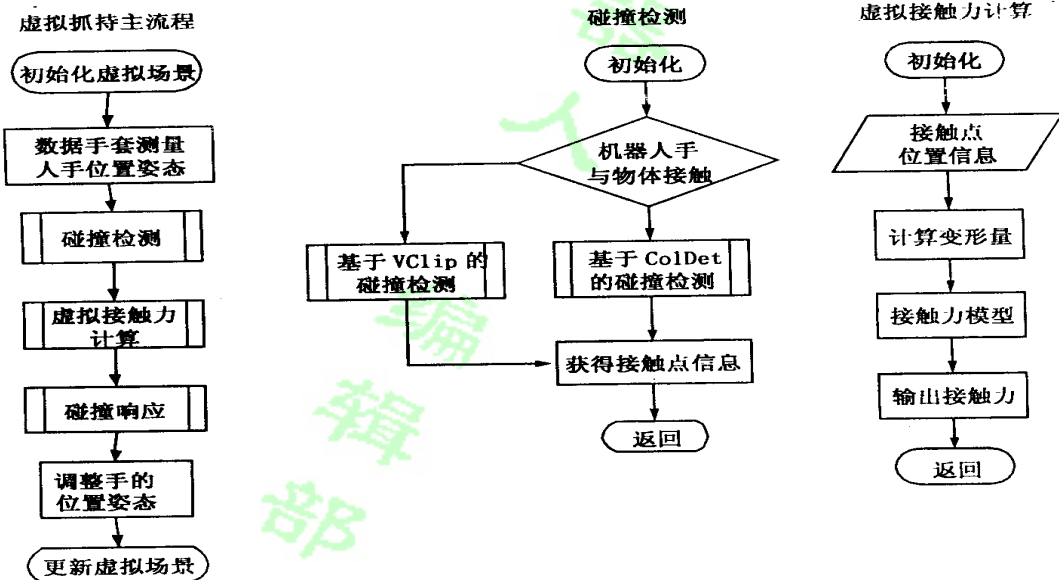


图2 虚拟抓持流程图

Fig.2 Flow chart of virtual grasp

### 3 系统的关键技术 (Key technologies)

#### 3.1 运动映射

人手可以完成复杂精细的动作<sup>[31]</sup>,因此目前大多数机器人多指手的设计采用了仿人手的策略,所以在对它们进行的运动规划中希望利用人的智能.运动映射的本质是跟踪人手手指的每个关节的运动,目的是让灵巧手实现类似人手的复杂和多样的操作.控制BH4灵巧手完成类似人手的抓持动作就是本文的运动映射的目标,我们结合虚拟手指和等效关节的概念来完成关节角度映射,这种方法的优

点是便于规划系统和控制系统的结合,因为规划的结果是各个关节转角,它们可以直接作为手指关节电机的控制信号.

在仿真试验中采用的BH4灵巧手是北京航空航天大学机器人研究所自主开发的4指12个自由度仿人手,拇指2个指节,3个自由度,其他3指结构相同,其运动学参见图3和图4.

图3中每一个手指有3个指节,4个关节, $\theta_3$ 和 $\theta_4$ 运动耦合,3个自由度.除了拇指比人手少一个自由度,其它3指和人手的食指、中指、无名指在运动

学上很接近.映射方法相对简单,人手拇指对应 BH4 拇指,人手食指、中指对应 BH4 的两个手指,而人手无名指和小指抽象为一个虚拟手指,把这个虚拟手指的运动映射给 BH4 的一个手指.

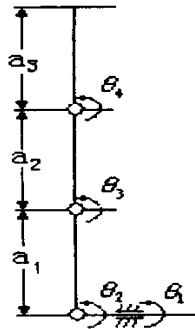


图 3 BH4 手指运动简图

Fig.3 Kinematic structure of BH4 finger

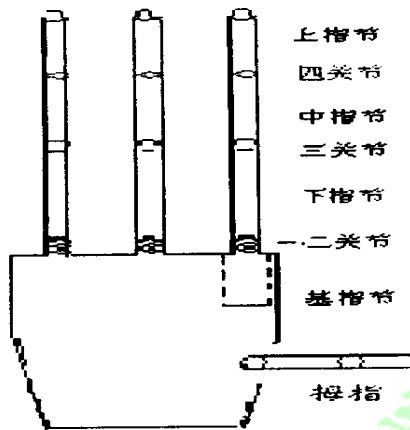


图 4 手掌布局示意图

Fig.4 Palm configuration

### 3.2 碰撞检测

碰撞检测和接触定位是计算机图形学、计算几何、机器人学等领域的一个经典问题,通过层次包围盒、空间细分、帧-帧相关性等技术已提出许多高效、可靠的检测算法<sup>[4]</sup>.碰撞检测库是一组类和函数构成的软件,其作用是计算虚拟物体之间的距离,判断是否接触,获得接触点的位置以及接触时物体之间的穿透深度等信息.对碰撞检测算法的要求是快速、精确、稳定.目前有 GJK、V-Clip、I-Collide、Solid、ColDet、SWIFT++ 等比较成熟的碰撞检测库<sup>[5]</sup>.本文认为判断优秀的碰撞检测库应该具有如下的特点:

- (1) 开放源码,免费.
- (2) 可以完成 3D 碰撞检测.
- (3) 系统稳定.

(4) 精确检测,能够返回碰撞的接触点、穿透深度和距离等碰撞响应中需要的信息.

根据上述标准可以确定增强 GJK、PQP、ColDet 和 V-Clip 是快速、准确和稳定性好的碰撞检测库.根据不同的应用环境,选择的依据也不一样,根据本系统的需要,我们选择了 V-Clip 和 ColDet 分别用于虚拟环境中人手和灵巧手的碰撞检测.

### 3.3 虚拟力计算

虚拟抓持与真实抓持的差别在于手与操作物体之间没有物理接触,手与物体之间的相对位置关系主要通过计算机产生的视觉反馈和数据手套上的接触反馈来判定,视觉反馈分辨率有限,存在遮挡现象,而且计算机生成一帧图像的时间远大于人的反应时间,而数据手套的触觉依赖于碰撞检测算法的计算效率.上述因素导致虚拟抓持中虚拟手和虚拟物体之间存在穿透现象,手和物体之间产生虚拟接触力.虚拟接触力有两个分力:正压力和摩擦力(本文仅考虑滑动摩擦),正压力与穿透深度成正比,摩擦力与压力成正比,具体的定义参照图 5.

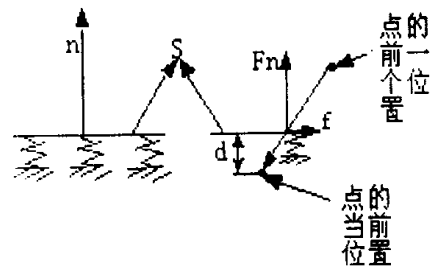


图 5 虚拟力模型

Fig.5 Virtual force model

图 5 中物体表面 \$S\$ 为弹性表面,弹性系数由物体自身的刚度系数确定,点的初始位置和当前位置确定了物体的运动方向,其在平面上投影的反向为摩擦力 \$f\$ 的方向,弹力 \$F\_n\$ 方向为面片的法矢方向 \$n\$,其大小和穿透量 \$d\$ 成正比.假定两个虚拟物体 \$A\_1\$ 和 \$A\_2\$ 之间的穿透力大小为 \$F\_{n1}\$ 和 \$F\_{n2}\$,穿透深度为 \$d\$,弹性系数分别为 \$k\_1\$ 和 \$k\_2\$,发生在 \$A\_1\$ 和 \$A\_2\$ 上的穿透深度分别为 \$d\_1\$ 和 \$d\_2\$,则有:

$$d_1 + d_2 = d \tag{1}$$

$$F_{n1} = k_1 d_1 \tag{2}$$

$$F_{n2} = k_2 d_2 \tag{3}$$

$$F_{n1} = F_{n2} \tag{4}$$

可得:

$$d_1 = \frac{k_2}{k_1 + k_2} d$$

$$d_2 = \frac{k_1}{k_1 + k_2} d$$

$$F_{nl} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} d$$

$A_1$  和  $A_2$  在接触点处的法向力大小相等,方向相反,沿着各自的穿透深度的反方向.假定在时刻  $t$ ,  $A_1$  第  $i$  个接触点的坐标为  $x(i, t)$ , 时刻  $t-1$  的坐标向量为  $x(i, t-1)$ , 则该接触点在时刻  $t$  的速度为:

$$v(i, t) = \frac{x(i, t) - x(i, t-1)}{\Delta t}$$

其中  $\Delta t$  为  $t$  和  $t-1$  之间的时间间隔.如果  $|v(i, t)| > \varepsilon$ , 则接触点的摩擦力为动摩擦力, 否则为静摩擦力, 摩擦力方向沿着  $x(i, t) - x(i, t-1)$  的方向.根据库仑定律, 静摩擦力的大小为:

$$f_s \leq u_s F_n \quad (5)$$

动摩擦力大小为

$$f_d = u_d F_n \quad (6)$$

其中  $u_s$  和  $u_d$  分别为静摩擦系数和动摩擦系数,  $F_n$  为法向力.

对于一个虚拟物体, 如果它与其它物体有  $n$  个接触点, 那么第  $i$  个接触点处的接触力为法向力  $F_n(i)$  和摩擦力  $f(i)$  (大小为  $f_d$  或者  $f_s$ ), 物体的重力为  $mg$ , 因此物体所受合力为:

$$\sum F = \sum_{i=1}^n F_n(i) + \sum_{i=1}^n f(i) + mg \quad (7)$$

$$\sum M = \sum_{i=1}^n F_n(i) \times r_i + \sum_{i=1}^n f(i) \times r_i \quad (8)$$

其中,  $F_n(i) = F_n(i) n(i)$ ,  $f(i) = f(i) \tau(i)$ ,  $n$  为接触点数目,  $m$  为物体质量,  $n(i)$  为接触点所在平面的单位法向量,  $\tau(i)$  为接触点所在平面的单位切向量,  $r_i$  为接触到质心的径向量.由于手指的变形, 手指与抓持物体之间是面接触, 而且接触力的分布是不均匀的, 表面刚度是随着接触面积变化的.目前有研究人员采用非线性接触有限元的方法建立接触力模型, 但是计算量很大, 无法满足抓持的实时性要求<sup>[6]</sup>, 因此本文未采用.

### 3.4 稳定抓持判据

计算虚拟接触力的假设和限制条件造成了虚拟力模型和真实力模型存在差距, 因此在试验中发现, 如果严格遵守力平衡、力矩平衡条件, 虚拟物体很难

达到稳定抓持状态, 在具体试验中, 本文给定了一个平衡范围来放宽平衡条件. 稳定抓持需要满足的力和力矩平衡条件如下:

$$|\sum F| = |\sum_{i=1}^n F_n(i) + \sum_{i=1}^n f(i) + mg| \leq \delta \quad (9)$$

$$|\sum M| = |\sum_{i=1}^n F_n(i) \times r_i + \sum_{i=1}^n f(i) \times r_i| \leq \eta \quad (10)$$

$\delta, \eta$  为平衡范围, 需要在试验过程中根据试验效果确定具体数值.

## 4 虚拟抓持试验 (Virtual grasp experiments)

我们选取美国 Immersion 公司生产的具有 18 个传感器的 Cybertouch 型号数据手套作为人手运动的输入设备. 利用该手套获得手的各个关节的转动角度, 经过数据处理和运动映射来控制虚拟环境中的人手和灵巧手进行虚拟抓持, 抓取了正方体和圆柱体, 其试验场景见图 6 和图 7.



图 6 试验环境场景图

Fig. 6 The experimental scene

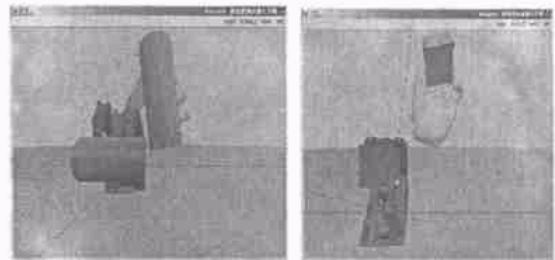


图 7 虚拟抓取

Fig. 7 Virtual grasp

试验结果: 在虚拟环境中灵巧手可以完成一部分人手的典型抓持动作.

(下转第 113 页)