

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.02.022

基于虚拟现实的力反馈交互系统应用技术

陆九如, 杭鲁滨, 黄晓波, 付志宇, 秦 伟

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘 要:力反馈交互系统能够实现力觉信息反馈,弥补传统人机交互中反馈信息单一的不足,在虚拟现实系统中有着广泛的应用。力反馈设备是人机力觉信息交互界面,是交互系统的重要组成部分。文章讨论了力反馈交互系统的应用组成及数据信息传递流程,并以 Omega.7 设备为例,介绍了力反馈设备的机构及电气组成;介绍了虚拟环境的一般构建内容和方法。最后对力反馈虚拟交互应用的进一步研究提出建议。

关 键 词:力反馈设备;交互系统;虚拟现实;碰撞检测

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)02-0098-05

Application Technology of Force Feedback Interaction System Based on Virtual Reality

LU Jiuru, HANG Lubing, HUANG Xiaobo, FU Zhiyu, QIN Wei

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

Abstract: Force feedback interaction system can realize the feedback force information and compensate the shortage of less feedback information in the traditional human-computer interaction. It has extensive application in the system of virtual reality. Force feedback device is the interface of force feedback between human and computer interaction, and it's a very important part of interaction system. The composition and data transfer flow of force feedback interaction system was discussed. The mechanism and electrical composition of force feedback device were introduced. With Omega.7 device for example, the structure and composition of force feedback device was introduced. The general construction contents and methods of virtual environment were introduced, and some suggestions were proposed about the further study on application of force feedback virtual interaction.

Key words: force feedback device; interaction system; virtual reality; collision detection

触觉是人类和外界进行信息交流的重要方式。物体的温度、纹理、硬度及形状等质感,均可通过触觉器官来进行感知。传统的遥操作与人机交互主要依赖于视觉听觉信息反馈,缺乏触觉感知,容易因信息感知单一和模糊而出现判断和操作的失误,系统应用可靠性降低。

力反馈交互系统在传统人机交互上,以高性能数据处理计算机、信息通信技术为基础,增加了力觉反馈,利用触觉感知增强人机的交流与协作。

虚拟现实是一个由计算机生成的虚拟环境,它可

以向人类提供听觉、视觉、触觉等感官刺激,实现人与虚拟世界的交互。科研工作者可以根据不同的需求,构造出相应的虚拟环境,以模拟相关的人机交互过程。

力反馈交互系统结合虚拟现实技术,能够使操作者对虚拟环境中的物体进行操作,并感知虚拟环境中物体运动、力觉交互,实现虚拟力觉再现。基于虚拟现实应用的力反馈交互系统,在航空、医疗、军事、制造、娱乐等领域有着广泛的应用^[1-3]。

本文从力反馈交互系统的工作原理出发,以瑞士 Force Dimension 公司的 Omega.7 设备为例,分析了力

收稿日期:2015-09-14;修回日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金(NFS51475050);上海市科学技术委员会重点支撑项目(12510501100)。

作者简介:陆九如(1990),男,安徽巢湖人,硕士研究生,主要研究领域为并联机构学。通信作者:杭鲁滨(1965),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为并联机器人机构、现代机构学、非标装备设计。E-mail:hanglb@126.com

反馈设备的功能组成,最后介绍了虚拟现实的构建方法和相关算法,为基于虚拟现实应用的力反馈交互系统搭建与研究提供参考。

1 力反馈交互系统原理

力反馈是指在人机交互过程中,计算机对操作者的输入做出响应,并通过力反馈设备作用于操作者的过程^[4-5]。

力反馈交互系统主要由操作者、力反馈设备、计算机、受控环境以及相关数据采集、通信等配套部分组成。其中,受控环境既可以是真实环境也可以是计算机仿真模拟的虚拟现实。力反馈设备通过传感器、数据采集模块实现操作者动作识别,受控环境根据操作者动作做出相应响应,并向计算机提供被操作对象的运动及交互力信息;计算机根据系统相应的控制算法,进行运动分析、反馈力计算及界面显示,最终通过力反馈设备的电机输出转矩合成空间反馈力作用于操作者。

力反馈交互系统通过高频率的刷新运行,使操作者感知受控环境中连续的力感和运动感,如图1所示。

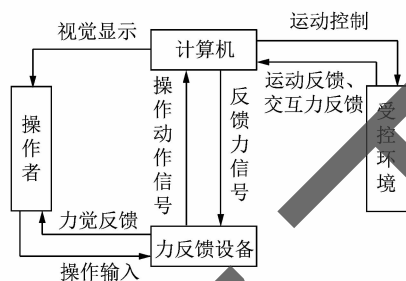


图1 力反馈交互系统原理图

Figure 1 Schematic diagram of force feedback device system

2 力反馈设备的组成

力反馈设备可以实现识别操作者的动作输入,并将计算机分析得出的反馈力作用与操作者。所以力反馈设备需要在交互机构的基础上,配备一定量的位移传感器与数据采集模块,以及相关的动力输出原件。

本文以Omega.7力反馈设备(图2)为例,讨论力反馈设备的工作原理与硬件组成。Omega.7大量使用轻质的铝合金材料,以Maxon直流空心杯电机为动力输出原件,采用钢丝绳牵引驱动,显著地降低了系统惯性,提高了系统的响应速度。同时,该设备采用并联机构与串联机构混联,充分利用串并联机构的优良特性,使系统的可靠性和稳定性得到增强。Omega.7的软件接口(DHD-API)提供了一个软件与设备之间开放的交互界面,方便用户进行2次开发和实际应用^[6]。



图2 Omega.7设备实物图

Figure 2 Entity diagram of Omega.7 device

2.1 Omega.7设备的交互机构

Omega.7的交互机构有7个自由度,可以看成是由Delta并联机构、腕关节机构及夹手机构3个部分串联组成。

1) Delta并联机构:提供三自由度平移运动,用于采集操作手的移动位置,其三维图和机构简图见图3和图4。

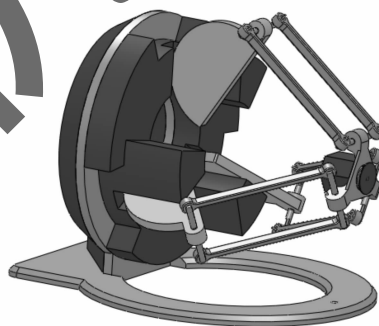


图3 Omega.7设备Delta机构三维图

Figure 3 3D model of Delta mechanism of Omega.7 device

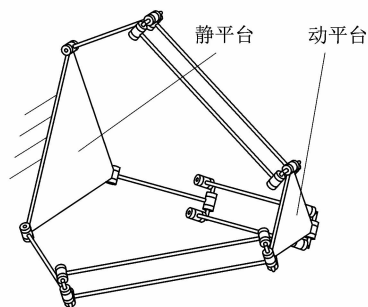


图4 Delta机构的机构简图

Figure 4 Schematic diagram of Delta mechanism

2) 腕关节机构:提供三自由度旋转运动,其3个旋转轴轴线交于一点,相邻连杆转轴相互垂直;用户操

作腕关节机构手柄,从而采集操作者腕部的转动姿态;三维图和机构简图见图5和图6。

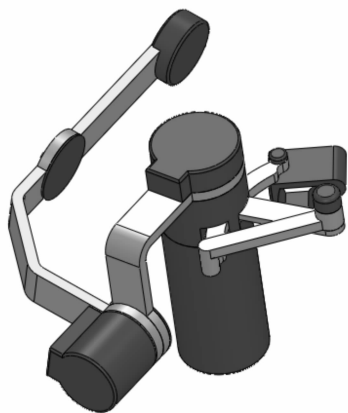


图5 Omega.7设备腕关节机构三维图
Figure 5 3D model of wrist mechanism of Omega.7 device

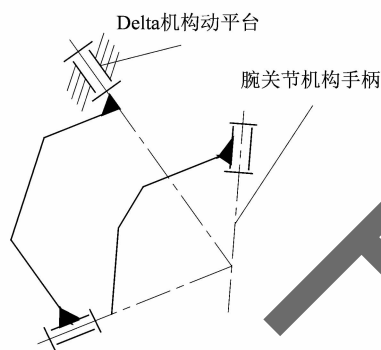


图6 腕关节机构的机构简图
Figure 6 Schematic diagram of wrist mechanism

3) 夹手机构:提供一个自由度的旋转夹取运动,用于采集用户手指的夹取动作,夹手机构布置在腕关节末端构件上,如图5所示。

2.2 Omega.7设备的电气控制组成

Omega.7的交互机构有7个自由度,需要安装7个编码器,以采集操作手的位置姿态以及夹取动作;其中Delta机构与基座相连的3个转动关节上分别布置3个编码器,通过运动学正解求出Delta机构动平台的位置;腕关节机构的3个转轴上分别布置3个编码器,通过运动学正解,求出手腕的姿态;在夹手机构的转轴处安装1个编码器,测出夹手夹取位置。

Omega.7的交互机构可以作用于操作者的2种反馈力:

1) 空间任意力。表示反馈力为三维矢量,方向大小在机构允许范围内任意可变;可由Delta机构与基座相连的3个转轴上转矩合成得到,故在该3个转轴

上分别布置电机,输出对应大小和方向的转矩以合成所需的反馈力,作用于操作者。

2) 夹取力。表示反馈力为相对于夹手机构的作用力;可将该力换算为作用于夹手机构转轴上的转矩,故在该转轴处布置电机,输出对应大小和方向的转矩,作用于操作者。

Omega.7力反馈设备内部布置有集成电路板,用于实现电气控制。若独立搭建基于Omega.7交互机构的控制系统时,可将其中的4个编码器和4个电机与相应的驱动器组合,构成4套直流伺服驱动单元;各伺服单元之间采用CAN总线通信连接,并经CAN卡,转为USB总线通信,最终与计算机相连;另外3个编码器与数据采集卡连接,并经数据采集卡将数据传输至计算机。具体电气控制组成如图7所示。

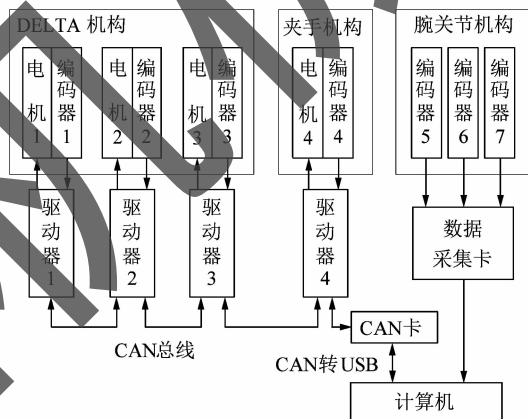


图7 搭建基于Omega.7力反馈设备的系统电气构成

Figure 7 Electric system construction of force feedback device based on Omega.7

3 虚拟现实技术与力反馈

虚拟现实是在计算机图形学、计算机仿真技术、人机接口技术、多媒体技术以及传感技术的基础上发展起来的交叉学科。虚拟现实可以模拟和构造现实中存在或不存在的环境与物体,可根据需求赋予其相应的属性,包括物体的几何形状、颜色、材质、纹理、硬度、质量等,环境中的重力场、电磁场、光线以及运动规律等;并可以随意添加和更改,虚拟操作相对于真实环境具有更大的灵活性和复杂性^[7]。基于虚拟现实应用的力反馈交互系统也称为虚拟力觉再现系统。

在力反馈设备与虚拟现实应用中,需要进行虚拟环境创建,碰撞检测,力反馈计算模型建立等相应的算法编写,系统自动计算出虚拟场景中物体接触碰撞的力大小,并反馈给力反馈交互设备,通过电机产生相应的转

矩合成反馈力,使用户真实感受虚拟交互作用^[8]。

3.1 虚拟环境的创建

虚拟环境是由计算机根据用户需求通过预定编写的程序生成的,包括三维背景、三维实体等。三维背景用于模拟真实环境,逼真的背景设计有利于增强操作者的沉浸感和提高人机交互的效果;三维实体用于模拟真实环境中的物体,是虚拟环境中的操作对象,与操作者进行虚拟交互。

三维背景的导入可以使用力触觉渲染引擎 CHAI 3D 的 CWorld 类、CCamera 类、CLight 类的 CBitmap 等来具体实现,可对背景的视角、光线以及图案等属性进行添加与编辑^[9]。

三维实体的导入,通常预先使用专门的三维设计软件,如 SolidWorks 等进行三维建模,以常见的 STL 格式保存。由于在 CHAI 3D 力触觉渲染引擎的仿真平台上,可以直接读取 3DS 格式的文件,需要再使用 3DS Max 软件直接将 STL 文件格式转换为 3DS 格式,最终导入到仿真系统中^[10]。图 8 所示为基于 CHAI 3D 创建的虚拟环境。

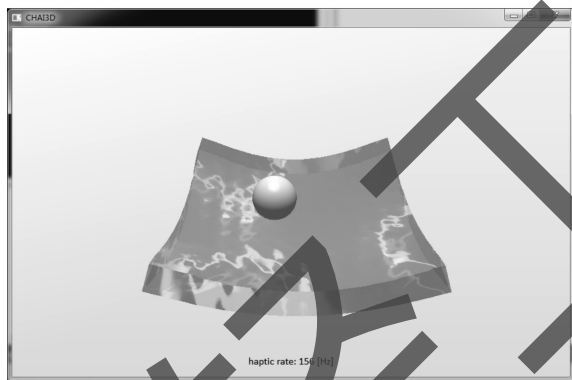


图 8 基于 CHAI 3D 的虚拟环境示例

Figure 8 Virtual environment example based on CHAI 3D

3.2 碰撞检测

碰撞检测用于实时检测虚拟环境中的操作手与物体、物体与物体间的相互作用,同时计算出反馈信号,通过物体的运动、变形等图形显示以及力反馈的方式表达出来。碰撞检测算法的好坏影响力反馈设备与虚拟现实交互的实时性和真实性。

碰撞检测的算法类别很多,其中包围盒技术受到广泛应用。以包围盒层次树的方法为例讨论碰撞检测过程;其中,包围盒类型选用轴向包围盒(AABB)^[11-12]。在包围盒树的遍历过程中,通过边界框相交测试迅速排除明显的不相交的几何元素,减少

不必要的相交测试的数量,这将极大地提高检测的效率。碰撞检测过程图如图 9 所示。

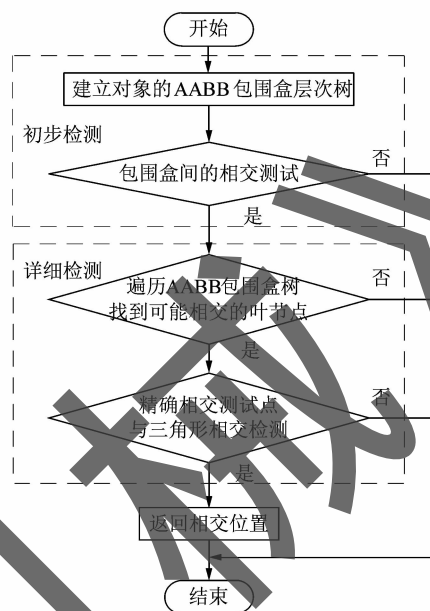


图 9 基于包围盒层次树碰撞检测过程

Figure 9 Flow chat of collision detection process based on AABB bounding box hierarchy tree

3.3 力反馈计算模型

力反馈计算模型用于计算虚拟环境中物体交互式的接触力,并由力反馈设备输出,作用于操作者。力反馈计算算法的好坏,直接影响仿真模拟的真实程度和仿真应用效果。目前,常用的物理建模方法有:有限元法、弹簧-质点法等^[13]。

有限元法是解决弹性力学问题时求解的常用方法之一。在每个单元中,用近似函数假定代表整个子域名解决未知领域的变量,并通过与等价变分原理或加权方法的原始问题的数学模型,建立了基本未知数常微分方程,该方程被称为有限元方程。有限元形变建模的本质是:对连续体划分为多个单元,并且将各个单元通过特定的方式连接起来去模拟原系统。这样就可将原来一个连续域求解的情况转换为求解离散化的情况,最终用数值方法来求解方程。有限元法的优点是能够逼真地模拟柔性体变形过程,建模精度高;缺点是运算量大、求解复杂、实时性差,很难满足实时仿真。

弹簧-质点法是指将虚拟的柔性物体离散化为一个个的质点,每个质点之间通过弹簧连接,故这样的离散化质点满足胡克定律。这种方法是经典的建模方法。该方法具有建模简单、变形计算量较低和实时性较好等优点。

3.4 力反馈的虚拟现实应用

随着力触觉交互技术的研究不断深入,其作为虚拟现实系统的重要组成部分受到越来越多的重视。这项技术已经被广泛应用于计算机辅助设计与制造业、虚拟装配、遥操作、医疗、娱乐、教育等领域。基于虚拟现实的力反馈应用要求进一步提高力反馈设备的可靠性、稳定性和实用性,从虚拟现实方面来看,需要深入研究虚拟环境的构建以及虚拟物体交互作用的生成算法,以获得更为逼真的模拟效果。

4 结语

力反馈交互系统用于实现人机的力觉信息交互,力反馈设备是其重要的交互界面,虚拟现实技术可搭建虚拟的操作环境和对象,处理和生成交互信息。基于虚拟现实的力反馈交互系统使用户参与和感知虚拟环境,有着极大的开放性、灵活性和适应性。为使该系统在各个领域取得更为广泛应用和发展,还需要进一步研究力反馈设备的可靠性、稳定性和实用性,要深入研究虚拟环境的构建以及虚拟物体交互作用的生成算法,增强力觉信息交互过程的真实感和沉浸感。

参考文献:

- [1] 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人(1): 技术发展现状[J]. 南京信息工程大学学报, 2013, 5(1): 1-19.
- [2] 李佳佳. 基于虚拟现实的力反馈设备的研究与应用[J]. 机械科学

与技术, 2011, 30(7): 1107-1111.

- [3] 张艳. 基于力反馈的虚拟手术器械的设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 1-14.
- [4] 杨立颖. 基于力反馈的机器人遥操作系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 1-11.
- [5] 田大鹏. 触觉反馈遥操作机器人关键控制技术的发展现状[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1042-1050.
- [6] 瑞士 Force Dimension 公司. 力触觉反馈装置 Omega. 7 资料手册[Z]. 北京: 瑞士 Force Dimension 公司, 2010.
- [7] 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: 1-25.
- [8] 刘威. 基于虚拟现实的力觉临场感遥操作研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 1-16.
- [9] 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, 2015: 11-12.
- [10] 程鹏辉, 梁君, 徐翔, 等. 3DS max 8.0 标准实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] BERGEN G V D. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees[J]. Journal of graphics tools, 1999, 4(2): 1-13.
- [12] KLOSOWSKI J T, HEID M, MJOSEPH B, et al. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops[J]. IEEE transaction on visualization and computer graphics, 1998, 4(1): 21-24.
- [13] 陈学文, 丑武胜, 刘静华, 等. 基于包围盒的碰撞检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(5): 46-50.

(上接第 97 页)

- [18] GOTT H, RITTER K, RITTER J, et al. Wire mesh welding machine: US, 3,814,145[P]. 1974-6-4.
- [19] LEE J H. Method for manufacturing wire mesh using electric resistance welding: Korea, 10-2004-0004012[P]. 2002-07-05.
- [20] RITTER J, GOTT H. Wire mesh double spot welding: US, 3, 286, 072[P]. 1966-11-15.
- [21] 何建萍. 微束等离子焊小电流问题的研究[J]. 上海工程技术大学学报, 1999, 13(2): 97-99.
- [22] 汤革新. 试论微束等离子弧焊接技术[J]. 特种设备安全技术, 2006(3): 49-50.
- [23] 葛志雄. 微束等离子弧焊在不锈钢丝网焊接中的应用[J]. 金属加工(热加工), 1994(3): 16.
- [24] 何建萍, 王付鑫, 殷雷, 等. 丝网微束等离子弧焊搭接焊的接头装

配方法: 中国, 201210380161. 9[P]. 2012-10-09.

- [25] 何建萍, 王付鑫, 殷雷, 等. 丝网微束等离子弧焊对接焊的接头装配方法: 中国, 201210380904. 2[P]. 2012-10-09.
- [26] 张红权, 齐志杨, 林涛. 不锈钢细丝网的微束等离子弧焊接工艺研究[C]//中国机械工程学会焊接学会. 第九次全国焊接会议论文集. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1999: 21-24.
- [27] 殷殿相, 迟元魁, 周大中, 等. 弱等离子弧焊接应用实例及经济分析[J]. 焊接, 1982(4): 13-23.
- [28] 刘志英, 桂建. 不锈钢细丝网的钎焊[J]. 焊接, 1996(2): 26-27.
- [29] 丁黎光, 吴德林, 丁伟. 激光焊接汽油机排气净化装置的金属丝网[J]. 焊接技术, 2008, 37(5): 24-26.
- [30] 张道良. 不锈钢薄筛网的焊接[J]. 焊接, 1982(7): 25.