

文章编号: 1002-0446(2003)02-0172-06

## 基于虚拟现实的机器人离线编程技术的研究

任 倩<sup>1</sup> 王树国<sup>1</sup> 陈祥立<sup>2</sup> 付宜利<sup>1</sup> 蔡鹤皋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学远达自动化工程有限公司 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 介绍了一个基于虚拟现实技术的机器人离线编程系统. 对系统结构作了描述, 讨论了机器人虚拟仿真环境建模技术、基于虚拟现实设备的机器人任务生成技术、碰撞检测算法. 该系统建立了基于虚拟现实技术的高级人机交互接口, 使机器人离线编程更加快速、方便和直观.

**关键词:** 虚拟现实; 机器人; 离线编程; 虚拟环境建模; 手势识别; 碰撞检测

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## RESEARCH ON ROBOT OFF-LINE PROGRAMMING BASED ON VIRTUAL REALITY

REN Qian<sup>1</sup> WANG Shu-guo<sup>1</sup> CHEN Xiang-li<sup>2</sup> FU Yi-li<sup>1</sup> CAI He-gao<sup>1</sup>

(1. Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. Yuanda Automation Engineering Corp., Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** This paper presents a robot off-line programming system based on virtual reality. In the article we describe the system structure, and discuss the robot virtual simulation environment modeling, the robot task generation based on virtual reality hardware devices and the collision detection technique. The system establishes advanced man-machine interactive interface based on virtual reality that makes robot off-line programming quicker, easier, and more intuitive.

**Keywords:** virtual reality, robot, off-line programming, virtual environment modeling, gesture recognition, collision detection

### 1 引言(Introduction)

虚拟现实是一种由计算机和电子技术创造的新世界, 是一个看似真实的模拟环境, 通过多种传感设备, 用户可根据自身的感觉, 使用人的自然技能对虚拟世界中的物体进行考察或操作, 参与其中的事件; 同时环境能提供视、听、摸等直观而又自然的实时感知, 使参与者有一种身临其境的感觉<sup>[1]</sup>. 虚拟现实技术使得人机交互方式发生了质的变化. 作为一种全新的人机接口技术, 虚拟现实的实质是用户使用能与计算机产生的数据空间进行直观的、感性的、自然的交互.

如今, 人们对迅速发展中的虚拟现实系统潜在的广阔应用前景兴趣倍增. 目前, 在世界范围内, 尤

其是欧美一些技术发达国家, 都投入了大量的人力和物力来进行虚拟现实技术的研究. 虚拟现实技术的应用领域极其广泛, 主要有娱乐、军事、航天、设计、生产制造、信息管理、商贸、建筑、医学、危险及恶劣环境下的遥操作、教育与培训、信息可视化以及远程通讯等<sup>[2]</sup>. 将虚拟现实技术应用于机器人领域是极具发展潜力和应用前景的研究方向之一.

在机器人应用系统中, 机器人编程是一个关键环节. 为适应市场发展的要求, 制造业正在向多品种、小批量的柔性化方向发展. 但是, 在中小批量生产中, 机器人的示教编程耗费的时间和人力相对较大. 因此, 随着制造业企业对柔性要求的进一步提高, 便产生了对更高效和更简单的编程方法的需要. 机器人离线编程系统是机器人编程语言的拓广, 它

基金项目: 国家 863 计划资助项目(课题编号: 2002AA422240); 国家自然科学基金资助项目(课题编号: 69685006).

收稿日期: 2002-10-08

利用计算机图形学的成果,建立起机器人及工作环境的模型,再利用一些规划算法,在离线的情况下进行机器人路径规划.机器人离线编程系统已被证明是一个有力的工具,用于增加安全性,减少机器人下线和降低成本等<sup>[3,4]</sup>.

虽然已有的机器人仿真和离线编程工具一定程度上满足了机器人工作的需求,但传统的机器人仿真与离线编程系统还是存在着几个显著的缺点<sup>[5]</sup>:

(1) 即使三维仿真也不是以人类工程学方式提供信息(即不是具有深度感的真三维),用户还是被动观察在屏幕上的场景,而且观察也不够.例如,虚拟碰撞检测难以实现,是因为用户的空间图像不够;

(2) 机器人工具中心点(TCP; Tool Center Point)路径不可能自由确定,现在使用不方便的方法,例如在目标点上按动鼠标,或从键盘输入目标点的坐标数据的方法,在操作者和仿真的机器人运动间没有三维交互;

(3) 仿真系统的操作需要专业的,技术熟练的操作者或有经验的机器人编程人员.

显然现有的工具没有考虑人的因素.只利用了一小部分人的能力,如多面的和立体的图像.这还受到鼠标,键盘和显示屏幕接口的限制.

跟传统的机器人仿真与编程系统相比较,计算机图形接口和交互式的 3 维虚拟环境大大提高了离线编程的有用性,从而虚拟现实可以为机器人仿真与离线编程提供更好的解决方案.操作者使用数据手套等三维交互工具和装在头上的立体显示设备,这样他就可以工作在一个虚拟的世界里,这个世界包括机器人及其周边环境,操作者不再是被动观察者.操作者可以通过数据手套控制被仿真的(虚拟的)机器人.如此,基于虚拟现实的机器人仿真与离线编程有如下优点<sup>[5]</sup>:

(1) 以人类工程形式提供信息是可能的,通过真三维有深度感的虚拟场景,可以在购买设备之前可视化工作单元布局,更好地了解机器人工作空间,很快建立机器人工作中心布局,更好地虚拟防止碰撞.

(2) 操作者使用类似数据手套的三维交互设备,可以很快确定机器人 TCP 的任一路径,操作者的全部能力都可以发挥(以六个自由度运动手).操作者自己可进行最优路径规划.

(3) 先进的人机接口大大简化了机器人编程,只需要很少的专家进行制造过程中的机器人编程.此外,这只花很少时间.借助先进的多模块人机接口,如有深度感的真三维图形,语音,手势等等,操作者

可以直观而容易地操作,一个没有经验的操作者或没有机器人编程知识的人也能很容易示教一项任务.操作者不必在使用机器人方面是技术熟练的,因为操作者只要做一件事,就是通过 VR 接口来完成任务.因此操作者不必了解机器人的机构或操作.操作者不必了解如何编程.显示任务本身就是一个编程过程.

(4) 快速程序修改及测试,便宜的用户培训与教育以及增强的安全性.

基于以上的讨论,虚拟现实技术,不仅是人机交互的一个友好界面,更为机器人的离线编程与仿真提供了一个良好的平台,减少编程时间,优化任务的执行,可以实现面向整个单元系统的并行编程,并可降低对编程者技术水平的要求.利用虚拟现实技术建立一个虚拟的机器人仿真与编程环境,不仅能给被培训者提供一个更真实自然的感觉,而且即使是一个没有经验的操作者也能很快学会操作机器人去完成任务.

## 2 系统结构(System structure)

我们采用单用户单主机多外设的 VR 系统结构<sup>[6]</sup>,如图 1 所示.它的主要组成部分是“VR 引擎”,是一台 SGI 图形工作站.在用户与 VR 引擎之间的交互以输入/输出(I/O)设备为媒介,I/O 设备读用户输入并反馈仿真结果.

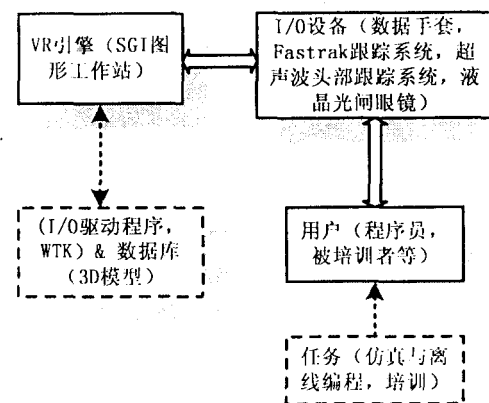


图 1 系统总体结构

Fig. 1 General structure of the system

### 2.1 硬件结构

系统硬件结构如图 2 所示.硬件系统由以下几个部分组成:

(1) SGI 图形工作站:以 Silicon Graphics 公司的 Indigo2 High Impact 图形工作站为计算平台;

(2) 数据手套:5DT(Fifth Dimension Technologies)公司的 5th Glove 数据手套;

(3) Fastrak 跟踪器系统:Polhemus 公司的 3SPACE Fastrak 传感器系统为虚拟机器人工作点(location)提供六自由度定位;

(4) 超声波头部跟踪器系统:Logitech 公司的三维超声波式头部跟踪器提供视觉随动;

(5) 液晶光闸眼镜:StereoGraphics 公司的 CrystalEyes 体视系统提供立体视觉.

利用超声波传感器系统,通过对用户头部运动的位置与方向的跟踪,计算机实时计算出跟随观察者视线变化的显示画面,再用立体显示设备将虚拟场景反馈给操作者.

同时操作者能利用 Polhemus 的 Fastrak 传感器系统操纵虚拟机器人的手臂的运动,通过计算得到一个变化后的机器人模型,并且通过数据手套所表示的手势语言可以去控制虚拟机器人手爪的动作.

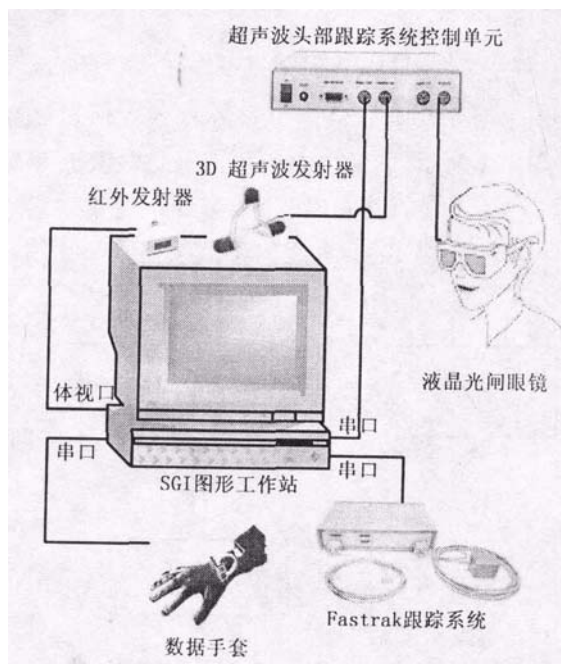


图 2 系统硬件结构组成

Fig. 2 The system hardware composition

## 2.2 软件结构

采用美国 Sense8 公司的 WorldToolkit (WTK) 函数库作为软件开发的基础,通过标定工业机器人的相应参数,利用我们开发的机器人几何建模系统<sup>[4]</sup> RGMS (Robot Geometric Modeling System) 建立机器人及相应环境物体的三维模型,并转换成 WTK 可识别的图形文件格式.然后在 WTK 程序中对这些模

型进行渲染,加入颜色,纹理,光照,阴影,细节层次等效果.

WTK 的工作核心是仿真管理程序 (Simulation Management Program),它控制着虚拟环境中各种进程的执行.仿真管理程序采用与 Windows 消息循环原理类似的处理方法对虚拟环境进行管理. WTK 的仿真管理工作流程如图 3 所示.

通过调用 WTuniverse\_go 进入仿真循环;

调用 WTuniverse\_stop 中断仿真循环;

使用 WTuniverse\_seteventorder 来改变事件的次序.

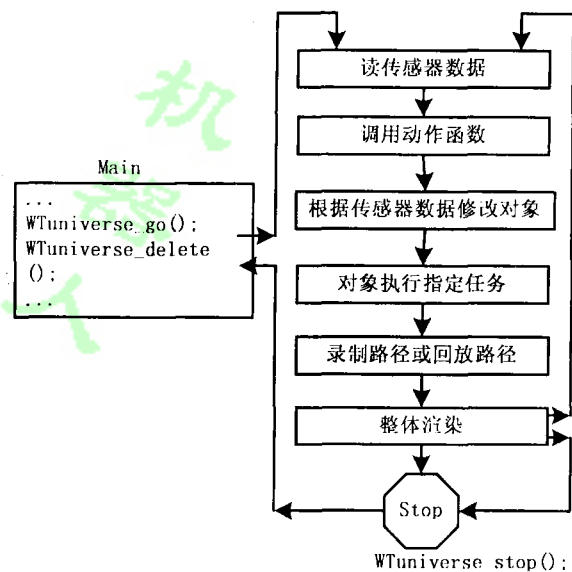


图 3 WTK 任务仿真循环

Fig. 3 WTK task simulation loop

## 3 基于虚拟现实的机器人仿真环境建模 (Robot simulation environment modeling based on VR)

首先进行三维建模,用 RGMS 进行对象的几何建模,以交互式的方法创建某个对象的模型.在 RGMS 中分别创建机器人及环境设备的 3D 模型,并转换成 WTK 可识别的图形文件格式,分别地在虚拟现实系统中进行审视,当满意后把它们作为单独的文件存储在模型库内.然后用 Sense8 公司的 WorldToolkit (WTK) 软件把这些模型作为节点加进场景图(Scene Graph)中,场景图是节点的分层排列.组成场景图时,把机器人的各部分组合起来,成为一个节点层次(Nodes Hierarchy).以 Puma 机器人为例,操作臂由 6 个连杆和 6 个关节组成.连杆 1 与基座由关节 1 相连接;连杆 2 与连杆 1 通过关节 2 相连接,依



此类推。末端执行器(或称夹具、手爪)与连杆 6 固接,基座固定不动。Puma 机器人的每个部分:基座、连杆 1、2、3、4、5、6,都作为一个分离节点(Separate Node)来创建,然后在 WTK 程序中按照自顶向下的方法将其组成分层结构。在这个分层中,基座是顶,沿着分层往下走,依次是连杆 1、2、3、4、5、6。当分层中的一个几何体运动时,它使分层在它下面的所有几何体都运动。分层在几何体上面的不受这个几何体运动的影响。例如,当连杆 2 运动时,连杆 3、4、5、6 随着它一起运动,而基座和连杆 1 不受它的影响。当连杆 6 运动时,其它几何体不受影响,因为它在分层最底部。因为几何体自动随它们的父几何体一起运动,如果你想使一个整个的几何体层次运动,你只需要使层次中最顶端的几何体运动。如,为了使整个 Puma 机器人运动,仅仅使基座运动就足够了。这种运动关系恰好与实际机器人运动关系相吻合。在传感器与机器人臂之间建立运动连接(Motion Link),就可以根据传感器数据信息驱动机器人臂的运动。我们把 Polhemus 的 Fastrak 传感器与机器人臂建立运动连接,并附加上运动约束,就可以用 Polhemus 的 Fastrak 传感器来控制机器人臂的运动了。

其次进行场景图的渲染。对几何图形节点加入颜色,纹理,光照,阴影,材质属性,从而增强模型的逼真度。

为了提高三维场景的动态显示速度,一个非常有效的方法就是降低场景的复杂度,即降低图形系统需处理的多边形数目。我们采用细节层次 LOD(Level of Detail)的方法。即为每个物体建立多个相似的模型,不同模型对物体的细节描述不同。对物体细节的描述越精确,模型也越复杂。根据物体在屏幕上所占区域大小及用户视点等因素为各物体选择不同的细节模型,从而减少需显示的多边形数目。

立体显示的实现采用 StereoGraphics 公司的 CrystalEyes 体视系统(如图 2 所示)。这个系统由液晶光闸眼镜,红外线控制器,立体显示监视器(SGI 工作站的图形显示器)组成。立体显示监视器能以两倍的普通扫描频率刷新屏幕,即 120 帧/s 的显示频率,此时在仿真软件中设定监视器工作在 STEREO 视频模式下。计算机把 RGB 信号发送给监视器。这些信号由两幅交替的、偏移的透视图象组成。眼镜上的红外线接受器检测到发射器发出的红外线(IR),眼镜电路就切换液晶镜头的开闭以便与在监视器上所显示的图象视域精确同步。当左视域显示时,左镜头打开,右镜头关闭,反之亦然。用这种方法每只眼睛

只看见对应的图象。这样大脑寄存下了一系列左、右眼图象并通过立体观测,把左、右眼图象进行融合,从而产生具有深度感的真三维的立体图象。实验证明,使用 CrystalEyes 光闸眼镜能够提供有效的深度感觉给用户。这个光闸眼镜为视觉上的范围到目标的确定能提供足够的景深,当使用虚拟机器人去抓取物体时这是一个很有用的线索。实际上,在有些情况下,这种类型的双目视觉可能优于完全的 VR 沉浸,因为当用户戴着光闸眼镜时,他还能看见并使用键盘。另外,光闸眼镜通常比头盔显示器便宜得多,并且每个人戴一副眼镜,几个人能共享立体视觉感知。光闸眼镜的使用表明,区别物体位置然后用机器人夹具拾取物体比在非立体模式下容易。快速确定一个物体与夹具的相对位置可以对摆放任务更有效地编程。

心理学的研究表明,运动的透视图象即使不是立体的也能引起显著的三维感觉。因此,图象显示跟随视线变化不仅为景物观察所必需,而且还提供了极为重要的运动视差。运动视差与双目视差的结合利用可形成强烈的体视感。确切地说,视线的变化应指观察者眼球的运动,但眼球运动的测量还有待研究。目前一般通过头部运动的测量来近似,而且常常限于颈关节的俯仰和偏转两个自由度<sup>[1]</sup>。

本系统的视线跟踪采用 Logitech 的三维头部跟踪器。它由三部分组成:发射器、接收器和一个控制单元。它的发射器是由三个分别相距 30cm、紧密固定在一个三角架上的超声波发生器组成的。发射器固定安装于面对操作者头部的前方,接收器由三个麦克风成三角形安装于液晶光闸眼镜上。控制单元通过计算声波从发射器到接收器的时间来确定头部的位置和方向。控制单元通过 RS232 串口与 SGI 工作站主机相连,将头部位置与方向的数据传送给主机,仿真系统的软件根据这些数据实时更新虚拟场景,以实现虚拟场景随用户的“视线”随动。

## 4 机器人任务离线编程(Robot task off-line programming)

### 4.1 机器人运动路径交互式生成

机器人路径生成过程中,首先要定义机器人末端执行器的工作点(location),然后生成机器人运动路径(path)。本系统中使用具有六个自由度的外部定位设备 Fastrak 传感器系统定位机器人工具中心点(TCP,即末端执行器的工作点),这样在操作者和仿真的机器人运动间可以实现真正的三维交互。

Fastrak 传感器系统由传感器、发射源及控制单元组成(如图 2 所示). 传感器和发射源都连接到控制单元上. 控制单元通过 RS232 串口与 SGI 工作站主机相连. 控制单元的功能是把来自传感器的模拟信号转换为适合于主机的形式以及控制发射源. 发射源发射电磁场, 由传感器检测到. 传感器然后将六个模拟信号, 即三个位置参数(X, Y, Z)和三个方向参数(侧倾, 俯仰, 偏航)送到控制单元, 这六个模拟信号作为已知的 Fastrak 传感器数据, 描述传感器的位置和方向. 传感器拿在手里或连到数据手套背部能检测人手或数据手套的位置和方向. 仿真软件接收来自控制单元的传感器的位置和方向数据, 即操作者手的运动, 来定位机器人 TCP.

用 Fastrak 传感器定位虚拟机器人 TCP 的原理是: 如果传感器相对于发射源的坐标系平移和旋转, 那么虚拟机器人的工具坐标架也做同样运动, 但是相对于虚拟仿真环境中的世界坐标系  $CS_w$ . 外部定位设备 Fastrak 传感器能对位置( $x, y, z$ )和方向( $r, \rho, w$ )产生同步的变化, 结果作为一个  $4 \times 4$  变换矩阵来输出. 外部输入设备还能用于设置对象在工作单元内的位置或用于控制摄像机运动. 同步改变 6 个自由度给用户一种直观的感觉, 即用他的手抓住末端执行器并直接把它移动到目标的感觉.

用外部六自由度输入设备指定了一系列的工作点后, 将这些工作点作为路径节点保存, 就形成了一条机器人运动路径. 记录并回放这些路径节点, 就实现了对机器人的示教过程. 而且利用这种直观的示教过程, 操作者自己就可以进行最优路径规划.

#### 4.2 基于数据手套的手势识别及控制机器人手爪的动作

数据手套是虚拟现实系统中广泛使用的传感设备, 用户通过数据手套, 与虚拟世界进行各种交互操作.

本系统所用的数据手套是 5DT (Fifth Dimension Technologies) 公司开发的 5th Glove, 手套的材料是 lycra, 手套背面嵌有采用 5DT 专有的弯曲技术的光纤传感器. 每个手指有一个传感器测量那个手指的平均弯曲, 共有 5 个光纤传感器来测量手的形状. 有一个 2 轴侧倾传感器用粘带安装在手腕部位, 它测量手的侧倾和俯仰角. 由于本系统在手套背部安装一个 6 自由度手跟踪器 (Polhemus 的 Fastrak 跟踪系统), 所以侧倾传感器的输出就不必要了, 手的位置由 6 自由度跟踪器的输出确定.

5th Glove 手套通过串口与 SGI 工作站主机相

连, 从而可使系统接收手套的信号, 以便知道手套的状态. 5th Glove 具有利用命令、报告数据、连续数据、模拟鼠标等工作方式. 根据它的命令和数据格式, 可以在程序中通过对串口的读写来与数据手套进行交互.

仿真软件读取数据手套手指的平均屈伸度(或说是手指中部关节的屈伸度), 它的取值范围是 0 到 255, 即最小屈伸度为 0(手指伸直的时候), 最大屈伸度为 255(手指最弯曲的时候).

操作者通过弯曲数据手套的手指来发出基于手势的命令以便控制机器人手爪操作物体. 采用模板匹配的方法来进行手势识别. 各手指的平均屈伸度作为匹配用的特征参数. 首先用户用例子手势创建模板, 用户做若干次期望的手势, 把训练数据存到一个 ASCII 文件中. 一旦建立了模板文件, 就可以通过把从计算机串口得到的数据手套的特征参数与模板文件里保存的数据相匹配来进行手势识别. 图 4 是所选的手势实例. 这些手势可作为系统命令去控制虚拟机器人的手爪的动作. 如 Fist(拳头)手势可用于命令机器人抓取物体, Flat Hand(平伸手)用于命令机器人释放物体.

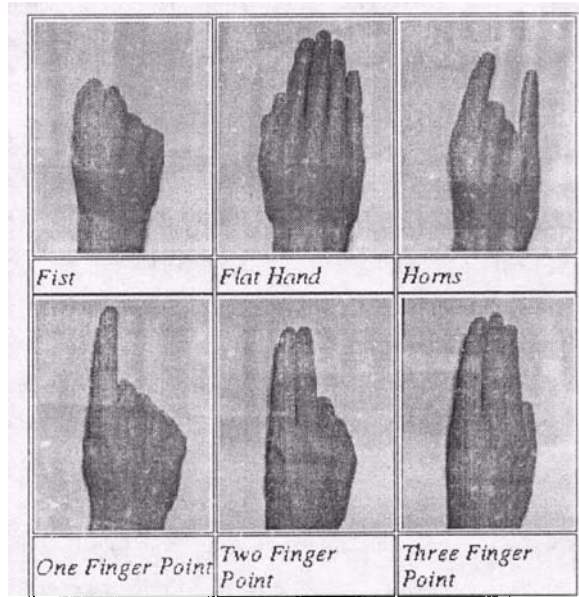


图 4 手势实例

Fig. 4 Sample gestures

## 5 碰撞检测(Collision detection)

碰撞检测是基于虚拟现实的机器人离线编程与仿真系统的关键技术, 其效果的好坏直接影响整个应用的真实感和精确性.

机器人与环境元素的碰撞检测问题可以转化为

多面体间的干涉检验问题. 在本系统中多面体间的干涉检验分三个层次进行: 包容盒检查、求交检查、体的包容性测试. 其具体算法如下<sup>[4]</sup>:

(1) 取机器人上的一个多面体  $M$ , 并求其外接包容盒;

(2) 取环境设备上的一个多面体  $S$ , 求其外接包容盒;

(3) 检测体  $M$  与体  $S$  的包容盒是否相包容, 是则进行下步, 否则  $M$  与  $S$  不发生碰撞, 转 6;

(4) 对  $S$  与  $M$  进行求交运算, 如果相交则发出碰撞报警信号, 转 6; 如果求不出两体的交点则进行下步;

(5) 调用截面法或面体包含测试算法, 检验体  $M$  是否为  $S$  所包含, 如包含则发出碰撞报警信号, 否则两体不发生干涉;

(6) 检验设备上的体取完否, 如没取完则转 2;

(7) 检验机器人上的体是否取完, 如没取完则转

1. 取完则完成检验.

在机器人沿某一路径运动过程中, 只要在每个离散点上都对其进行上述检验就可判断机器人在这条路径中是否与环境发生碰撞, 从而判定当前机器人运动路径是否为安全路径. 在本系统中, 机器人具有自动碰撞检测能力. 机器人在虚拟场景空间移动之前, 仿真器对它前进方向上的所有障碍物进行自动检测, 如果发现有障碍物, 通过颜色的变化来指示即将发生的碰撞. 此时, 如果操作者继续发出前进命令, 仿真器将拒绝执行该前进命令并报警. 实验表明, 将该算法应用在本机器人离线编程系统中, 能够快速准确地进行机器人工作单元各元素碰撞检测.

## 6 结论(Conclusion)

VR 技术在我国尚属起步阶段, 不少单位正着手对该项技术进行规划, 并在医疗、航空、机器人等方面进行初步的探讨, 而整体研究水平还处在相当初级的阶段. 根据我国现有条件和研究现状, 将虚拟现实技术和机器人离线编程与仿真技术相结合, 进行面向机器人应用的虚拟技术研究, 不仅能大大拓宽机器人的应用范围, 而且能进一步带动和促进相关科学、相关技术的互相渗透和发展.

本文介绍了一个基于虚拟现实的机器人离线编程系统, 通过讨论虚拟仿真环境的建模技术以及研究将各种 VR 硬件设备应用于机器人离线编程系统, 建立了一个具有友好的高级人机交互接口的机器人离线编程系统, 为工业机器人的离线编程提供了一个直观而有效的虚拟环境.

## 参考文献 (References)

- [1] 曾芬芳. 虚拟现实技术. 上海交通大学出版社, 1997
- [2] 赵春霞. 虚拟环境下机器人装配单元编程与系统仿真技术的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1998
- [3] 熊有伦, 丁汉等. 机器人学. 机械工业出版社, 1992
- [4] 付宜利. 基于动态图形仿真的机器人离线编程技术研究及系统开发. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1996
- [5] 王家钦. 虚拟现实——不仅是仿真. 机器人情报. 1993, 4: 3-7
- [6] G C Burdea. Invited Review: The Synergy Between Virtual Reality and Robotics. IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1999, 15(3): 400-410

## 作者简介:

任 倩 (1971-), 女, 博士研究生. 研究领域: 机器人仿真与离线编程, 虚拟现实.

王树国 (1958-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人仿真、智能机器人、虚拟现实.

陈祥立 (1971-), 男, 工程师. 研究领域: 计算机控制.