

基于 PVR 技术的机器人动态仿真控制

罗 熊, 樊晓平, 易 晟, 张 航

(中南大学 信息科学与工程学院 自动化工程研究中心, 湖南 长沙 410083)

摘要: 详细分析了基于投射式虚拟现实技术的机器人动态仿真控制, 提出了仿真控制系统的总体框架, 实现了仿真任务, 并对投射式虚拟现实技术进行了改进, 就投射式虚拟现实技术在一般工程仿真中的应用进行了有益的探讨。

关键词: 投射式虚拟现实; 工业机器人; 任务演绎; 动作规划; 仿真

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

PVR-based dynamic simulation control for robot manipulators

LUO Xiong, FAN Xiao-ping, YI Sheng, ZHANG Hang

(Research Center for Automation Engineering, College of Information Science and Engineering,
Central South University, Hunan Changsha 410083, China)

Abstract: The dynamic simulation control strategy was analyzed in detail for robot manipulators based on PVR (projective virtual reality) technology. A framework for simulation control system was presented and the simulation task was accomplished. Meanwhile, the PVR technology was improved and the application of PVR technology in the general engineering simulation was discussed.

Key words: projective virtual reality; industrial robot; task deduction; action planning; simulation

1 引言(Introduction)

近年来, 虚拟现实(virtual reality, VR)技术已广泛应用于机器人领域中, 主要表现在临场感机器人系统、仿真试验平台系统及人机交互系统等多个方面^[1], 其中尤以临场感机器人系统最为典型。工作在交互方式下的临场感机器人系统是由操作者、远程机器人、计算机虚拟环境(virtual environment, VE)以及人机交互界面构成。系统正是通过基于多传感器和VE的人机交互界面, 把远程信息反馈给操作者, 操作者再根据反馈信息控制远程机器人的动作。德国学者 Freund 和 Rossmann 根据他们在一系列基于任务规划、现实世界建模以及基于传感器的协作式机器人控制的研究中所取得的成果, 于1997年正式提出投射式虚拟现实这一新技术^[2]。这是一种将VR技术应用到临场感机器人系统中的新方法, 与一般的临场感方法有较大的不同。虽然PVR这一技术正式提出来的时间不长, 但近年来已得到广泛应用, 取得了一些令人欣喜的成果^[3~5]。

PVR技术实现的关键是“任务演绎”(task deduc-

tion)。当操作者进行操作时, 系统将识别操作者执行的不同的子任务, 并对这些子任务进行一定的推导演绎归纳之后, 送给系统的“动作规划”(action planning)部件, 由其安全地执行。任务演绎的引入是PVR技术区别于其他方法的显著之处。任务演绎是通过一类特殊的Petri网, 即“带标记的状态转移网”(state/transition nets with named marks)来描述实现的, 这在下面的3.1节中将详细介绍。动作规划的主要职能是“理解”自“任务演绎”部件传送过来的高层任务描述, 并转换为相应的机器人动作, 它属于一组多策略的规划系统, 其具体实现算法将在3.2节中介绍。“任务演绎”部件和“动作规划”部件是实现PVR技术的系统关键功能块。

本文拟将PVR技术应用到日本产安川UP6台式MOTOMAN机器人控制中, 研究PVR技术在仿真试验平台系统、人机交互系统和临场感机器人系统中的综合应用, 讨论基于PVR技术的MOTOMAN机器人动态仿真控制, 同时, 在应用过程中, 对PVR技术进行改进与优化。

2 基于 PVR 技术的机器人仿真系统结构框架 (PVR-based robot simulation system framework)

由于 VR 技术的高速发展以及实用技术的不断完善,目前已经可以将实用的 VR 技术应用到工程系统的仿真控制中.基于 PVR 技术的机器人仿真控制就是在实际的工程控制中应用 VR 技术的一次有益尝试.

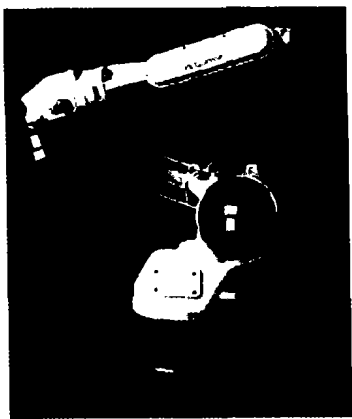


图 1 日产安川 UP6 MOTOMAN 机器人实物照片

Fig. 1 Photo of Yasakawa UP6 MOTOMAN robot

2.1 应用对象 (Application object)

选择中南大学自动化工程研究中心购置的日本安川公司生产的 UP6 台式 MOTOMAN 机器人作为仿真试验对象,其基本结构见图 1.该机器人在工业

应用中具有良好的通用性,配有良好的接口,同时也适合建模,易于进行虚拟仿真控制.对 UP6-MOTOMAN 机器人基于 PVR 技术的动态仿真控制方法可以很方便地推广到一般的工程仿真控制之中去.

2.2 系统结构 (System framework)

基于 PVR 技术的 MOTOMAN 机器人动态仿真控制系统是 PVR 技术在仿真试验平台系统、人机交互系统和临场感机器人系统中的一个综合应用,其仿真系统结构见图 2.

2.3 系统主要功能描述 (Main functions)

整个仿真系统的主要功能包括:

1) 3D 交互式访问功能.操作者可以改变其视点或视线来观察 MOTOMAN 机器人的运行情况及其周围环境的 VR 表现.

2) 交互式的仿真机器人运动控制功能.操作者可以利用输入设备来控制虚拟的 MOTOMAN 机器人各个关节的运动.

3) 机器人工作任务的自动完成功能.当输入了比较确定的工作任务时,虚拟机器人可以自动进行任务演绎和动作规划,在 VE 中自动进行虚拟仿真操作,同时将满意的虚拟操作结果整体投射到真实环境中去,由 MOTOMAN 机器人真实地执行;当输入的工作任务比较抽象,难以明确地加以描述的时候,可以引入人机交互仿真操作机制,通过适应性动作的引导,也可在 VE 中进行虚拟操作,满意后,亦可进行投射操作.

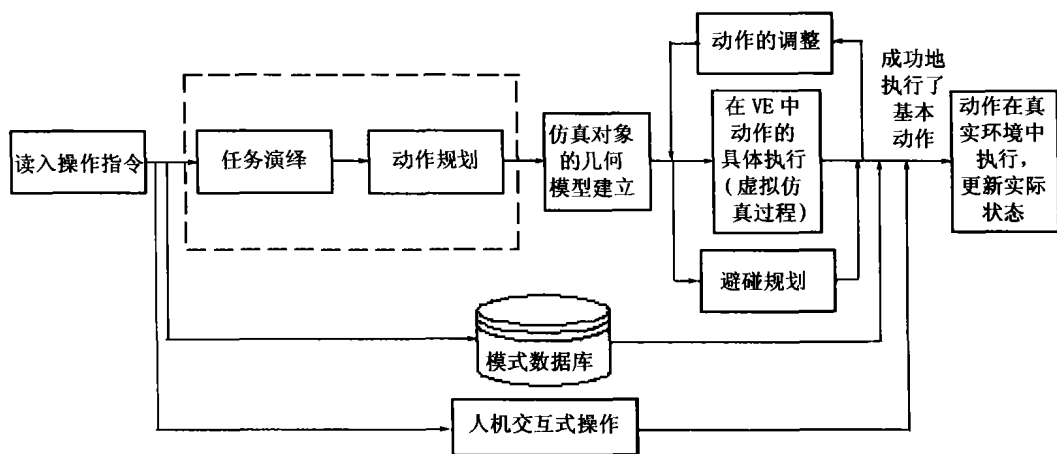


图 2 基于 PVR 技术的机器人仿真控制系统结构框架

Fig. 2 PVR-based robot simulation system framework

3 机器人动态仿真控制系统的实现 (Implementation for dynamic simulation control system of robot manipulators)

3.1 “任务演绎”的实现 (Implementation for “task deduction”)

为了描述方便起见,假设工作任务是要求机械

手抓住物体 O 从 A 点移至 B 点(或从 B 点移至 A 点).于是,可构造如下特殊的 Petri 网(图 3),即“带标记的状态转移网”.

如果操作者抓住了物体 O,那么就会计算出相应的消息.在上述 Petri 网中,就会从状态“物体 O 在 A 点”变为状态“物体 O 在移动”.如果再次放开物

体O,状态又会变为“物体O已被放开”.在接下来的变换中,就会计算出物体O的实际空间坐标.若该坐标恰为B点的坐标,则状态又会从“物体O已被放开”变为“物体O在B点”.在这一过程中,将会经过“将物体O从A移至B”这一动作标志,将该动

作送入机器人控制系统,亦即下面的“动作规划”部件中去执行.

通过引入该 Petri 网,可有效地克服时延,弥补VE模型的不精确性,使仿真系统具有更大的通用性,极大地克服了一般临场感方法的缺陷和不足.

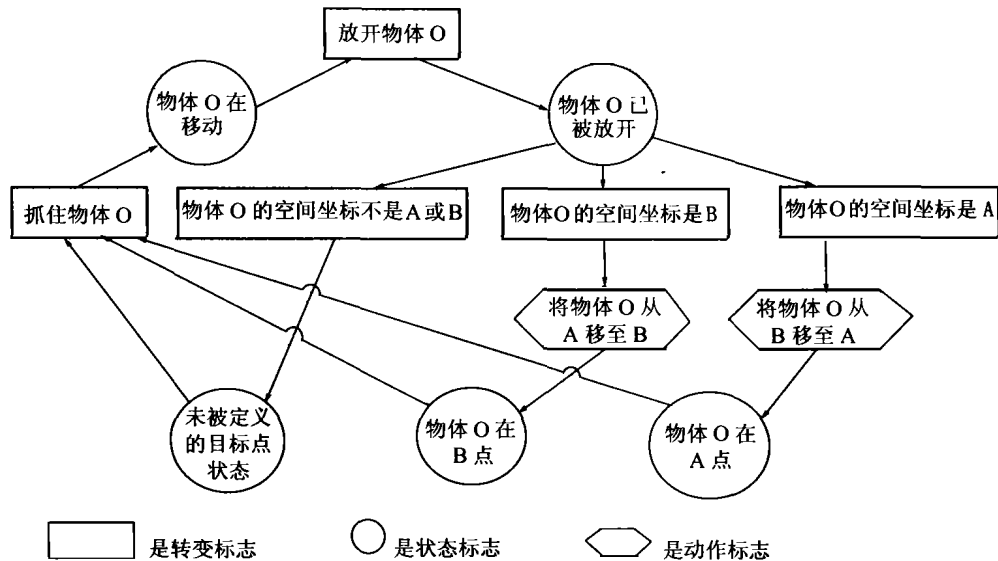


图3 机械手抓物的任务演绎网络

Fig. 3 Task deduction net for robot manipulators which demonstrates how to grasp object

3.2 “动作规划”的实现 (Implementation for “action planning”)

在本文介绍的仿真系统中,动作规划的具体实现算法如下:

1) 依据系统的资源,构造一个约束网络(constraint net),网络中的节点是整个“动作规划”过程中涉及的变量(状态).对约束网络进行求解,就是要为网络中每一节点找到一个明确的对应值,并以此表示满足了所有的约束.在求解过程中,一旦发现网络中至少有一个约束不能被满足(即至少有一个节点无法取值),表明造成了不能到达结束节点的矛盾情况,此时相应地激活解决该矛盾的另一个任务,再回到约束网络中针对新任务进行求解,若仍不能求解,就再相应地激活另一个动作模式,再反馈,再求解.在这一过程中,就是根据对应于实际任务的约束网络的求解来选择相应的动作模式.如果将物体O从A移至B,其目标状态就是“物体O在B点”,要实现该状态,就要相应地激活一系列状态,如“物体O的移动”、“物体O处于被抓住的状态”、“物体O被抓起”、“物体O在A点”等.

2) 在求解了约束网络之后,根据一系列状态(或称为动作模式)内部对应的机器人基本动作的实现,产生一组临时有序的动作序列.

3) 将该动作序列送入“执行单元”,在VE中执行,观测效果.若效果满意,可以直接根据动作模式,利用人机接口,指挥机器人实际地在真实环境中执行动作;若不满意,可进行动作的调整,加入引导过程,协助机器人完成任务.

3.3 避碰检测的实现 (Implementation for collision avoidance)

在虚拟执行的过程中,要注意避碰的检测.这包括在障碍物间移动,以及在物体间进行精确的滑动时,对免于碰撞的移动路径的规划计算.避碰检测要预先定义,再由机器人来执行,在对MOTOMAN机器人的仿真中,暂时没有考虑机器人的物理属性模型,因此,避碰检测仅仅只要考虑几何上的约束.这就是一个纯粹的几何路径规划问题,亦即:给出一个机器人的初始位置和方向,以及目标位置和方向,产生一条路径,该路径指定了机械手的一个连续的移动位置和方向序列,避免了机器人的链杆与工作区中所有障碍物的接触,此路径于初始位置和方向处开始,在机械手的目标位置和方向处结束.

在这里,虚拟工作空间相对比较简单,因此本文将检测过程分为了粗线条运动以及细微运动,前者表示在比较大的空间中进行路径规划检测,后者则表示在一个相对狭小的空间中进行检测.在稍复杂

的工作环境之中,则可以把基于避碰的机器人轨迹规划问题建模为一个高度非线性优化问题,具有多种冗余、多种约束及多重目标(如行走路程总长度最短、机器人能量消耗最少等).现在解决轨迹规划的人工智能算法已有很多,如可视图法、人工势场法等,但在这里,本文将采用进化算法进行求解.采用多层次动态结构化编码方案,利用低、中、高三层进化策略分别优化距离、路径和关节角度偏差,引入Lamarck效应,融合启发式搜索与遗传搜索,有效地解决轨迹规划问题^[6].通过引入进化算法,可以进一步加速问题的优化求解过程,得到高质量的解.

3.4 模式数据库的引入(Introduction of model database)

在这里,创造性地引入了模式数据库,使机器人具有学习的能力,在执行动作任务的过程中,将会把该任务及对应的系列动作和轨迹都保存在模式数据库之中.以后,当输入的操作任务是模式数据库中已有的任务或部分任务时,就可直接按模式数据库中的轨迹执行相应动作,免去再进行任务演绎和动作规划的步骤,节省工作量.

3.5 MOTOMAN 机器人几何模型的建立与 VE 的生成(Establishment for geometric model of MOTOMAN robot and creation for VE)

建立机器人的几何模型,就是要生成机器人的视景,它包括:计算生成具有真实感的机器人几何实体模型,涉及了对光照、颜色、立体感和运动感的处理;计算并生成虚拟背景;将机器人模型和虚拟背景迭加在 VE 中.

根据以下的算法可生成理想的 MOTOMAN 机器人几何模型:

- 1) 将 MOTOMAN 机器人模型分解为:立柱、机械手底座、低端手臂、高端手臂、手腕、手爪共 6 个子模型;
- 2) 获取各个子模型的形状、尺寸及对应的运动范围^[7];
- 3) 用 OpenGL 预定的图形库^[8]来构建各个子模型;
- 4) 生成光照模型,对几何模型进行光照的处理.为简单起见,VE 中物体的表面属性和光源位置均已被固定,是已知的.这里采用了局部光照模型,只考虑了由光源引起的漫反射分量^[9](实际上,还可以考虑镜面反射分量^[10]).设 V 为观察方向, I 是 V 方向的光亮度,根据局部光照模型,有

$$I = K_a I_{pa} + K_d \sum \frac{J_{pd} N_0 \cdot L_0}{r + c},$$

这里的 K_a 是环境反射系数, I_{pa} 是环境反射有效光亮度, K_d 是漫反射系数, J_{pd} 是漫反射有效光强度,

N_0 是单位法向量, L_0 是单位光线向量, r 是光源至被照明点的距离, c 是常数.根据此光照模型,可以计算出机器人各个部件模块在任意方向 V 的光亮度 I ,从而就可以对机器人模型进行合理的光照处理.对处理完的子模型,可生成一个模型数据库,存入内存,以后可及时地加以调用,用以生成满意的机器人 VE.调用的过程就是将模型数据库中的各个子模型取出来进行装配,也就是模型的链接过程.其具体的实施过程是将子模型作为动态坐标系的一个子节点,利用模型之间原本的层次关系,以从手腕到底座的顺序构成一个控制链,然后再根据控制链来进行装配.当要生成机器人仿真系统的 VE 时,就只需把用于装配的控制链作为一个单独的节点插入到用于描述 VE 的实体树状模型中,然后再采用深度优先遍历算法对整个树形结构进行遍历即可.

3.6 虚拟仿真过程(Virtual simulation process)

先通过调用 OpenGL 的 `glCallList()` 函数分别生成机器人几何模型的各个子模型.这只是静态的图形,要形成动画效果,仿真过程中就要不断修正机器人模型,而这可以通过跟踪当前机器人的关节角来重绘机器人模型,从而响应来自于 Windows 系统函数 `TIMER()` 中的 `WM_TIMER` 消息的方式来加以实现.每幅新的屏幕场景与以前展示的场景相比,只是作了轻微的改变,这样就可以使它的外观看起来好像是屏幕上的物体正在移动一样.另外,在机器人运动过程中,其关节角的修正是基于机器人链杆坐标系,即 Denavit-Hartenberg 坐标系而定的,具体计算公式可参见文献^[11,12].

需要指出,机械手是一个开链式的多连杆结构,其动作形态是由旋转、伸缩和回转三种基本动作组合而成.这里采用分布式求解策略(DSM)来解决机械手的运动合成问题.DSM 的基本思想是以机械手与目标物体之间的距离作为目标函数,通过缩小两者之间的距离,来使机械手准确地到达目标物体^[9].

3.7 在 PVR 中引入交互式操作(Introduction of interactive operation in PVR)

这里要特别提到的是在仿真过程中使用的人机交互式操作.在仿真过程中,通过使用人机交互式操作,可以使机器人具有响应操作者意图的能力,从而能使机器人和操作者协同进行工作.利用安装在机器人上的力传感器,就能检测出由操作者所施加的力/力矩,从而就能感知到操作者的动作意图.本文将机器人沿着操作者施加的力/力矩的方向上所做的动作称为适应性动作.机器人将被操作者引导到规划轨迹上的某个特定位置开始执行输入的任务.对于那些重复的输入任务,机器人将会充分利用以

前的执行信息,而不需操作者介入,大大节省了操作者的工作量,这些在3.4节中已有所介绍。

另一方面,在PVR技术的使用过程中,存在的一个主要问题就是作为PVR中关键部件之一的任务演绎部件在非定型环境中进行任务规划将变得很困难,因此,对那些很难被描述成参数化任务的特殊应用以及不能被动作演绎部件所预见的特殊应用来说,PVR技术就不太适用,在这种情况下,一般只能采用传统的带时延的临场感方法^[13]。

解决这一问题的方法之一是结合PVR的开放式框架,不断完善任务演绎部件的功能。这在文[13]中已有所讨论。在这里,结合人机交互式操作仿真的方法,也可以比较顺利地解决该问题。通过引入适应性工作模式,让操作者逐步引导机器人去完成各种复杂的非定型的操作任务,在引导过程中,充分利用存储在计算机内存中的轨迹知识和机器人的学习能力,让机器人自己寻找相匹配的轨迹,既节省了操作者的工作量,又提高了轨迹的跟踪精度。以上的这个过程可以通过3.6节中介绍的虚拟仿真方法在已建立的机器人仿真VE中进行实时演示,一旦虚拟仿真结果达到了设计需求,就可以进入投射操作,将虚拟仿真引导的结果向真实环境中投射。在投射操作中,还可以允许操作者随时介入,干预投射过程,纠正偏差,使机器人真正地按学到的轨迹去运作,完成特定的操作任务。

在针对MOTOMAN机器人的动态仿真控制中,通过引入人机交互式操作的仿真方法,完善了当前的PVR技术,弥补了PVR技术的一些不足,从而极大地拓展了PVR的应用领域。

3.8 MOTOMAN 机器人在实际工作空间中的运行 (Implementation for MOTOMAN robot in workspace)

在虚拟操作得到了满意的结果之后,即可将虚拟操作结果作为一个整体对象投射到工作现场,完成实际的操作任务。投射操作将虚拟操作转化为真实的操作。具体过程如下所述。

在这里,以下面第4节中开发的虚拟仿真系统所产生的虚拟操作结果为例。一旦该虚拟操作结果达到了预先设定的满意度之后,就可通过MOTOMAN机器人本身附带的动态链接库(dynamic link library, DLL)文件MOTOCOM32.DLL的支持,用C++语言(基于Visual C++ 6.0开发平台)将满意的虚拟操作结果整体地编写成一段可执行的程序代码^[13],通过RS232C电缆实现对MOTOMAN机器人在真实环境中的实际操作。以上介绍的整个操作过程已在中南大学自动化工程研究中心运动控制实验室中成功实现,并进行了实际检验,得到了应用。在本文的第4节中,给出了其中的一些虚拟动态仿真结果。

从对上述系统功能实现的介绍过程中,可以看出,基于PVR技术的MOTOMAN机器人动态仿真控制系统除了能用来进行MOTOMAN机器人的虚拟仿真试验,还可以支持多种输入设备,担当虚拟的训练平台。当然,这里引入PVR技术来对MOTOMAN机器人进行仿真控制,只是PVR技术应用的一个方面,通过引入的投射功能以及人机交互式操作,仿真系统已具备了操作真实环境的能力,能够应用到更广泛的领域之中。

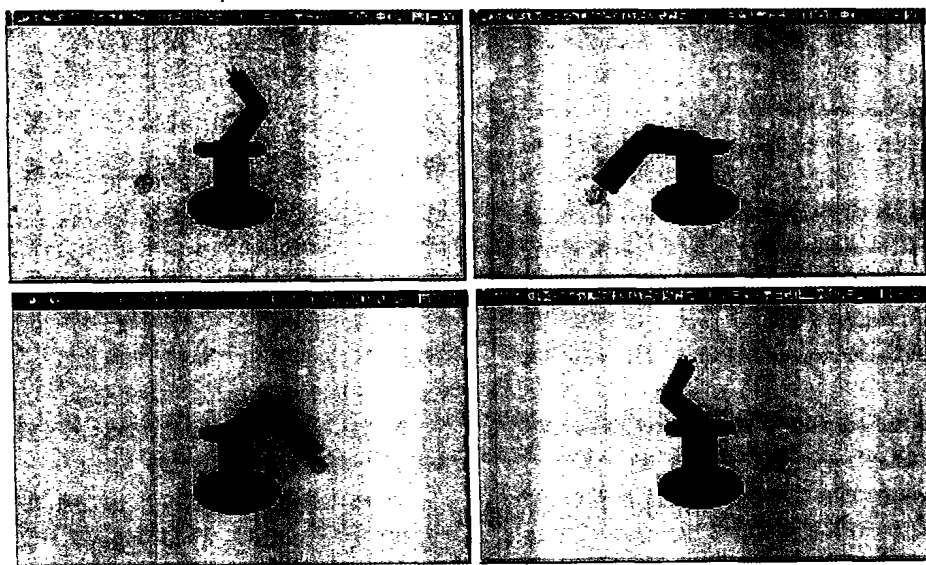


图4 基于PVR技术的MOTOMAN机器人动态仿真结果图

Fig. 4 PVR-based dynamic simulation results for MOTOMAN robot manipulators

4 仿真结果(Simulation results)

本文以 PC 机为硬件开发平台,建立了基于 PVR 技术的 MOTOMAN 机器人虚拟动态仿真控制系统,该仿真系统基于 Windows 2000 的开发平台,采用 OpenGL 三维图形软件接口,具体地用 C++ Builder 5.0 来实现,完成了机械手对工作空间中一虚拟物体的抓取与移动,主要的仿真结果如图 4 所示。

5 结论(Conclusions)

基于 PVR 技术的 MOTOMAN 机器人动态仿真控制系统是将 PVR 技术应用到机器人控制,特别是动态控制中的一次有益尝试。它使用了 PVR 技术,建造了具有良好交互性的人机界面,同时又提出了许多新的实现辅助手段,完善了 PVR 技术,弥补了其应用上的不足。综合分析,本系统具有以下显著特点:

1) 比较完整地建立了整个系统的 VE,具有比较明显的真实感。

2) 本系统在实现过程中,引入了人机交互式操作仿真方法,克服了 PVR 技术中的一些缺陷。

3) 本系统既可作为虚拟仿真训练平台,进行逼真的临场感操作训练;又可作为多功能机器人操作仿真试验平台,进行机器人操作仿真试验。

此外,本文还对 PVR 技术中的关键算法作了进一步的改进与优化,取得了明显的效果。限于篇幅,将另文介绍。

参考文献(References):

- [1] 赵春霞, Li Y F, 王树国, 等. 虚拟现实的发展及在机器人系统中的应用与研究[J]. 机器人, 1999, 21(5): 395-400.
(ZHAO Chunxia, Li Y F, WANG Shuguo, et al. The development on VR and its application study on robot system [J]. Robot, 1999, 21(5): 395-400.)
- [2] FREUND E, ROSSMANN J. Projective virtual reality: bridging the gap between virtual reality and robotics [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 411-422.
- [3] Institute of Robotics Research (IRF). Projective VR [EB/OL]. <http://www.irf.de/cosimir.eng/vr/Projektive VR/ProjektiveVR.htm>, 2001.
- [4] Institute of Robotics Research (IRF). The COSIMIR Family [EB/OL]. <http://www.irf.de/cosimir.eng/welcome.htm>, 2001.
- [5] 罗熊, 樊晓平, 毛新宇. PVR 系统中场景处理的基于 CORBA 技术的组件化设计[J]. 计算机应用研究, 2002, 19(1): 12-

15.

(LUO Xiong, FAN Xiaoping, MAO Xinyu. On the design of scene processing in PVR systems based on CORBA component technology [J]. Application Research of Computers, 2002, 19(1): 12-15.)

- [6] 王正志, 薄涛. 进化计算[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
(WANG Zhengzhi, BO Tao. Evolutionary Computation [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2000.)
- [7] YASKAWA ELECTRIC CORP. MOTOMAN-UP6 Instructions [R]. Tokyo: Yasmjykawa Electric Corp., 1999.
- [8] SILICON GRAPHICS INC. OpenGL Developer Documentation [EB/OL]. <http://www.opengl.org/developers/documentation/index.html>, 2003.
- [9] 唐好选, 洪炳熔. 基于 VR 的空间机器人遥控操作仿真的研究[J]. 计算机应用研究, 2000, 17(8): 67-69.
(TANG Haoxuan, HONG Bingrong. Study on teleoperation simulation for space robot based on VR [J]. Application Research of Computers, 2000, 17(8): 67-69.)
- [10] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
(MA Songde, ZHANG Zhengyou. Computer Vision: Fundamental Computation Theory and Algorithms [M]. Beijing: Science Press, 1998.)
- [11] SRIIOON S. Animated Simulation of Human-Robot Interactions [M]. Clemson: Clemson University Press, 1999.
- [12] 付京逊, 冈萨雷斯 R C, 李 C S G. 机器人学: 控制、传感技术、视觉、智能[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1989.
(FU K S, GONZALEZ R C, LI C S G. Robotics: Control, Sensing Technique, Vision, Intelligence [M]. Beijing: Chinese Technology Press, 1989.)
- [13] 罗熊, 樊晓平. 投射式虚拟现实的原理与实现及其在机器人控制中的应用[J]. 高技术通讯, 2002, 12(3): 96-100.
(LUO Xiong, FAN Xiaoping. Principle and implementation for projective virtual reality with its applications in robot control [J]. High Technology Letters, 2002, 12(3): 96-100.)

作者简介:

罗 熊 (1976—), 男, 系统分析员(高级工程师), IEEE 机器人和自动化(RAS)学会会员, 现为中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为虚拟现实技术, 机器人控制, 计算机网络等. 已发表有关论文 20 余篇. E-mail: xiongluo@sohu.com;

樊晓平 (1961—), 男, 工学博士, 中南大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为机器人控制, 虚拟现实技术, 智能交通系统等. 已发表有关论文 80 余篇;

易 晨 (1975—), 男, 工学硕士. 主要研究方向为计算机网络, 机器人控制, 虚拟现实技术等;

张 航 (1966—), 男, 工学硕士, 讲师, 在职博士研究生. 主要研究方向为计算机智能控制, 先进集成制造系统(CIMS).