

文章编号:1000-5013(2014)02-0161-04

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.02.0161

采用受控 Petri 网的虚拟现实 遥操作机器人系统模型

张国亮, 钟必能

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对机器人遥操作系统分布式操作的特点,采用面向对象的虚拟现实建模方法构建系统的原型,使模型的复杂性不再与具体完成的任务有关.基于时序逻辑的推理规则,利用 Petri 网作为遥操作控制系统模拟与验证的工具,描述操作任务间的因果关系,并以共享控制模式为模型,描述遥操作控制系统的动态行为.最后,通过实验验证方法的合理性.

关键词: 机器人;遥操作;受控 Petri 网;虚拟现实;虚拟可操作对象

中图分类号: TP 242.6

文献标志码: A

在机器人遥操作系统中,数据的通讯时延是影响系统性能的关键因素,然而,遥操作系统本身异构的平台使得时延难以直接得到消除.传统的处理方法多从控制算法的角度考虑,如耗散理论和波变量控制^[1-2]、LQG 最优控制^[3]、 H_∞ 控制^[4-7]和滑模控制^[8]等.但 Smith^[9]、侯志林等^[10]通过实验证实,这类从控制结构角度考虑的方法仅能应用在时延小于 2 s 的情况,难以应对变时延和大时延问题.从稳定性角度来看,虚拟现实(VR)遥操作是目前克服遥操作大时延的最有效方法^[11].然而,基于 VR 的遥操作系统面临的重要问题是软件仿真与控制系统验证相互分离,当 VR 仿真系统与实际环境情况之间存在巨大差异或操作任务发生改变时,需要对整个 VR 系统重新设计,难以形成统一有效的保障措施和评价体系.为此,本文提出利用 Petri 网作为分布式遥操作控制系统模拟与验证的工具,基于时序逻辑的推理规则,描述操作任务间的因果关系,并将它与面向对象的机器人建模方法结合,对机器人遥操作控制系统的动态行为进行描述.

1 基于面向对象编程的机器人虚拟现实系统建模

虚拟现实的机器人遥操作系统是利用虚拟预测环境代替真实环境与操作者完成交互,操作者操作的对象是没有时延的虚拟对象,由此能够消除时延对系统稳定性造成的影响.由于机器人操作场景复杂,涉及的运动实体多,因此,如何有效地描述机器人及其环境的虚拟模型是机器人遥操作软件系统开发过程中的关键步骤.为保证系统的仿真结构具有通用性和充分的可扩展性,文中借鉴软件工程中面向对象编程(OOP)的系统结构,分别对静态被动操作目标和机器人运动实体建模.这一结构使系统模型的复杂性不再与完成的任务有关,而主要依赖对象的重用扩展性及其相互之间关系的描述.

为在 OOP 的对象描述与 Petri 网形式化模型之间建立映射关系,借助本体论中“知识”概念集合来建立模型本体库.首先,采用非形式化语言确定本体论中“知识”的主题范围,根据主题范围识别语义关系,建立抽象的概念集合,此概念集合为 OOP 的描述性模型和 Petri 网的形式化模型中各组成元素共

收稿日期: 2013-06-20

通信作者: 张国亮(1978-),男,讲师,博士,主要从事机器人视觉伺服控制、机器人遥操作的研究. E-mail: zg10227@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202468);福建省自然科学基金资助项目(2013J05091);华侨大学高层次人才科研启动项目(11BS107)

享;然后,将 OOP 的软件方法与本体论中的定义映射,生成统一的集成本体集合.最后,将此集合形式化描述为 OOP 中的类、对象和属性.

图 1 为基于面向对象编程的机器人虚拟现实系统.由图 1 可看出:模型的本体结构具体可分为抽象层、具体层和实体层 3 个层次,每一个层次结构以类的形式组织,子类能够继承父类的抽象特性,代表比其父类更具体或范围更小的实体概念.抽象层用于描述共有的、基本的概念和规则,以及它们之间的本质联系,由基本元素、结构元素和特征元素构成.其中:基本元素是与模型中与基本图元相对应的概念集合;结构元素是描述模型中层次结构的概念集合;特征元素是对基本图元的特征进行实际描述的概念集合.具体层是抽象层本体模型子类,包括对象间的空间位置和运动关系,物理特征属性,如材质、纹理、颜色、光照等.实体层是由抽象层本体和具体层本体产生的实例,用于具体描述本体论中实体的性质.

在 VR 建模的过程中,机器人关节等运动实体会在操作过程中发生空间位置的相对变化.为保证虚拟运动与真实运动的一致性,基于 OOP 的建模原则,将机器人的基座作为机器人运动学坐标系的原点,同时指定其为父节点,将机器人手臂模型文件以子节点的方式调入场景,进行物理特性的描述,并按运动的逻辑关系进行装配.按照这种关系建立起的虚拟对象运动学模型,完全模拟了机器人和被操作物体之间的空间运动关系.在驱动虚拟模型时,父节点的运动可以直接传递到子节点上,从而不需要经过繁琐的机器人正运动学计算.

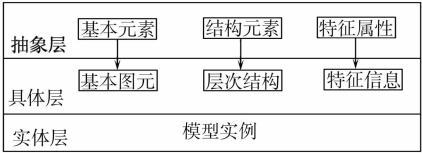


图 1 基于面向对象编程的机器人虚拟现实系统结构

Fig. 1 Robot virtual reality system based on OOP

2 利用 Petri 网分析遥操作系统的动态行为

2.1 基于虚拟可操作对象的系统确认服务模型

为清晰描述系统的动态行为,借助虚拟可操作对象(VOO)对遥操作系统中可操作单元进行抽象定义.VOO 代表实际操作指令中操作能力、查询能力和受控能力的具体描述.采用客户-服务器双端口网络,建立操作者与远端机器人系统之间的信息交换工作模式,如图 2 所示.远端机器人系统是信息服务的提供者,而客户端的操作者是信息服务的请求者.同时,在客户端和服务器端分别建立 VOO 请求器和 VOO 应答器,用于系统的网络连接与通讯.服务器端的 VOO 实现远端实际机器人的具体控制,而客户端的 VOO 代表了操作者本人及其交互平台.

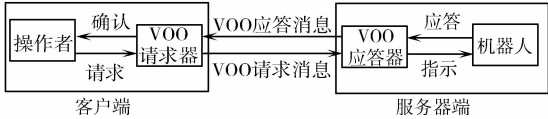


图 2 遥操作机器人系统确认服务机制

Fig. 2 Scheme of teleoperation robot verification service

为实现“操作者”与“机器人”之间有效的沟通,采用遵循确认服务运行机制的协议数据包(PDP)来定义 VOO 的层次结构信息及相应数据.首先,操作者向服务器发出 PDP 请求,并一直处于等待 VOO 应答状态;然后,VOO 应答器接收并取走该请求,再传送给虚拟操作单元;最后,机器人完成任务后将确认信息按 PDP 格式重新发送回请求器,并恢复请求器初始状态.按照这种工作模式,操作者在前一任务未完成时,不能执行下一个动作命令,从而使遥操作系统的安全得到保障.

2.2 基于 Petri 网的共享控制系统模型

基于 VOO 的系统确认服务模型,采用受控 Petri 网描述共享控制下遥操作系统模型,如图 3 所示.操作者首先发出控制请求,信息经由服务器端 VOO 应答器进入服务器端.如果是 VOO 的信息查询指令,变迁事件 t22 触发,并通过变迁事件 t26 向客户端反馈当前 VOO 的工作状态;如果是 VOO 的操作控制指令,则由变迁事件 t23 将 VOO 的操作信息放入机器人规划器状态库所 p22.它一方面可以通过变迁事件 t24 对所给定任务进行自主规划,另一方面,可以接受主端操作者发出的直接控制指令,驱动机器人动作.

为保证操作执行的有效性和安全性,在虚拟操作对象执行具体动作之前,应向主端操作者提交即将执行的方案,只有经过主端操作者确认或修正后的方案才能提交,并最终由虚拟操作对象执行.同时,为体现主端操作者干预能力,在模型中添加控制库所 c1 和 c2.其中:c1 在最底层控制虚拟操作设备的动

作执行;c2 则控制虚拟操作对象重新规划,以实现主端操作者干预之后的重新自主规划.

3 实验分析

按照文中 OOP 的建模理论,搭建了基于虚拟现实遥操作机器人场景,如图 4 所示.图 4 中的整个虚拟操作环境分为 2 个子模型,即静态的场景和动态的机器人.静态场景包括一水平地面、一带有四个门的房子、四个球体障碍物,这些对象只有确定的图元和特征属性的描述,没有运动层次关系.动态的机器人需要在场景中随时运动.因此,采用父子继承关系来描述基座与机械臂模型之间的运动关系,从机器人底座到手臂末端形成一个控制链,此控制链将作为整个一个节点加入到虚拟场景中.

从图 4 可知:所提出的建模方法能有效地描述机器人及其周围环境,且依据层次化建模关系,模型的修改和扩展非常容易,使得系统建模的复杂性不再依赖于具体的操作任务.

图 5,6 分别是直接控制和监督控制的系统模型.由图 5 可知:直接控制中的变迁事件 t23 按照操作者发出的控制指令顺序依次执行,操作者意图可直接传达到远端虚拟机器人,操作直观易行.但如果远端系统出现异常情况,主端操作者无法及时得到通知,对于系统的安全性造成威胁.由图 6 可知:监督控制可接受主端操作者发出的相对复杂任务指令,且有能力通过变迁事件 t24 对所给定任务进自主行规划,智能程度较高.然而,这一控制结构必须对操作任务和操作环境具备充分的认知,当操作环境或任务改变时,监督控制无法有效执行.

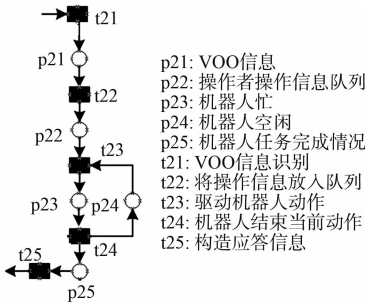


图 5 遥操作机器人直接控制系统模型
Fig. 5 Model of direct teleoperation robot

在静态和动态环境下,3 种控制方法的机器人避障操作用时(t)和任务完成情况,如表 1 所示.从表 1 可知:所研究的共享控制模型可让操作者和远端机器人在操作过程中责任和智能共享,体现了机器人与操作者的协调规划能力.这一方法的任务用时比直接控制方法短,且在动态环境下无需监控反馈.虽然,操作者的操作时间比监督控制有所加长,但是,系统操作的可靠程度明显优于督控制方法.

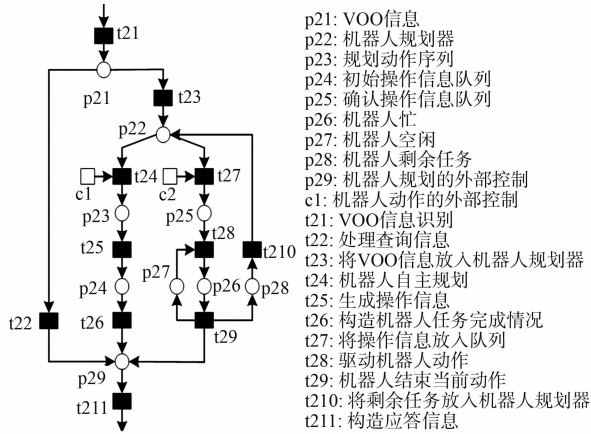


图 3 基于 Petri 网的共享控制系统模型
Fig. 3 Model of shared control system based on Petri net

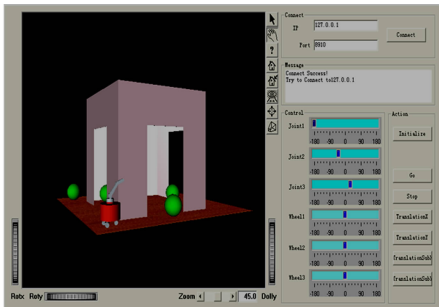


图 4 虚拟现实及操作控制演示界面
Fig. 4 Interface of virtual reality and operation

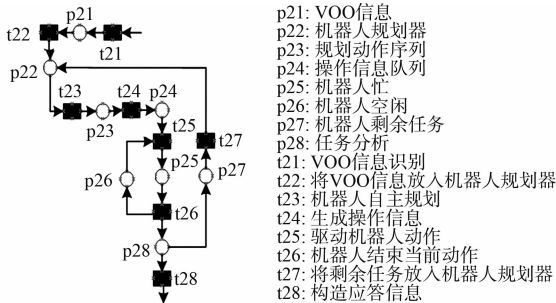


图 6 遥操作机器人监督控制系统模型
Fig. 6 Model of supervised teleoperation robot

表 1 不同环境下的避障操作情况

Tab. 1 Obstacle avoidance under different condition

控制方法	静态		动态	
	t/s	任务完成情况	t/s	任务完成情况
直接控制	120	可完成	300	可完成(需要环境监控反馈)
监督控制	30	可完成	—	无法完成
共享控制	90	可完成	180	可完成

4 结束语

以机器人遥操作系统为研究对象,给出一种适合于描述机器人遥操作控制系统的软件建模方法.利用 OOP 丰富的对象描述手段和 Petri 网形式化的分析方法对控制系统进行分析,并从理论模型上探讨基于受控 Petri 网建立虚拟现实遥操作系统的可能,从而为今后进一步发展大规模复杂化模型奠定理论基础.

参考文献:

- [1] YALCIN B, OHNISHI K. Stable and transparent time-delayed teleoperation by direct acceleration waves[J]. IEEE Trans, 2010, 57(9): 3228-3238.
- [2] YE Y Q, LIU P X, MENG M Q H. Improving trajectory tracking in wave-variable-based teleoperation[J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2010, 15(2): 321-326.
- [3] GANJEFAR S, NAJIBI S, MOMENI H. A novel structure for the optimal control of bilateral teleoperation systems with variable time delay[J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(7): 1537-1555.
- [4] 郑敏, 费树岷. 遥操作机器人系统的鲁棒控制[J]. 自动化技术与应用, 2006, 25(1): 11-15.
- [5] VANDER P E, KANNO T, YOKOKOHJI Y. Robust variable-scale bilateral control for micro teleoperation[C]// Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE Press, 2008: 62-65.
- [6] ZHANG Wen-an, YU Li. Output feedback stabilization of networked control systems with packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1705-1710.
- [7] SHA-SADEGHI M, MOMENI H R, AMIRIFAR R. H_∞ and L_1 control of a teleoperation system via LMIs[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 20(6): 669-677.
- [8] 孟中杰, 徐秀栋, 蔡佳, 等. 空间遥操作机器人主从双边自适应内模控制[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(10): 2424-2426.
- [9] SMITH A, HASHRTUDI-ZAAD K. Smith predictor type control architectures for time delayed teleoperation[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(8): 797-818.
- [10] 侯志林, 韦庆, 韩大鹏, 等. 双边遥操作系统操作性能度量频域指标[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 823-831.
- [11] 蒋再男, 刘宏, 谢宗武, 等. 3D 图形预测仿真及虚拟夹具的大时延遥操作技术[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 78-81.

Modelling of Virtual Reality Robot Teleoperation Based on Controlled Petri-Net

ZHANG Guo-liang, ZHONG Bi-neng

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Considering of distributed characteristic of the robot teleoperation, virtual reality system prototype is built with object orientation programming method, which make complexity of model is indispensable with specific task. Petri-Net is utilized to simulate and verify teleoperation control system. Causation among tasks is described based on timing sequence logical rule. Furthermore, shared teleoperation control model is adopted to analyze dynamic performance. Finally, a simple experiment shows the approach is applicable.

Keywords: robot; teleoperation; controlled petri net; virtual reality; virtual operation object

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)