

文章编号: 1002-0446(2002)04-0375-05

基于 web 的远程控制机器人研究*

耿海霞 陈启军 王月娟

(同济大学信息与控制工程系 上海 200092; 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室 沈阳 110016)

摘要: Internet 连接了全球的计算机, 它为人们提供了分享数据、图片、影像甚至实时影像的机会, 但与远程地点的真实交互还是离不开象机器人这样的智能设备. Web 技术与机器人控制技术的结合, 促成了基于 web 的远程控制机器人概念的诞生. 本文将就基于 web 的远程控制机器人的发展历程、研究现状、主要技术与实现、发展趋势及应用前景等做综合的介绍.

关键词: Web; Internet; 远程控制机器人

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH ON WEB-BASED TELEROBOT

GENG Haixia CHEN Qijun WANG Yuejuan

(Dept. of Information and Control Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092;

Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Robotics Laboratory, Shenyang 110016)

Abstract: Internet connects computers all over the world and provides people with chances to share data, pictures, videos even real-time videos. But it's impossible to get real interaction with distant places without such intelligent devices as robots. The combination of web and robot control technology gave birth to the concept of web-based telerobot. This paper presents a full introduction of the evolution, research status, main technology and realization, future work and application of the web-based telerobot.

Keywords: web, internet, telerobot

1 引言(Introduction)

基于 web 的远程控制机器人是指将机器人与 Internet 连接, 使得人们可以在任何地方通过浏览器访问机器人, 实现对机器人的远程监视和控制. 它以 Internet 为构架, 不仅降低了遥操作系统的成本, 也使机器人为 Internet 上越来越多的人所熟悉和共享. 基于 web 的远程控制机器人拓展了机器人远程控制的概念, 它不仅可出现在过去应用遥操作的危险领域, 还开辟了诸如远程制造、医疗诊断、教育培训和娱乐等新领域.

广义上讲, 机器人是由计算机控制的自动化装置. 而远程控制机器人(telerobot), 则是接受远距离控制指令的机器人, 这些指令一般来自受过培训的操作人员. 操作人员在远程环境中操作, 并通过位置传感器、力传感器、视觉反馈等方式测量控制结果. 50 年代, R. Goertz 开发了远程操作机械手并将其用

于 Los Alamos 的辐射区, 从此便诞生了遥操作 (teleoperation)^[1]. 遥操作主要用于危险环境或人们不易到达的地区, 如辐射区、地下采矿、水下运载和航空航天, 目前又扩展到勘探、导弹部署和医疗等应用领域. 在这一领域, NASA (National Aeronautics and Space Administration 美国国家航空航天局) 是最大的研究组织之一. 1997 年, NASA 的火星旅居者 (Mars Sojourner) 远程控制机器人就已成功地应用于火星计划^[2].

Internet 的发展使远程控制机器人技术走近人们的生活. 1980 年, 产生了基于文本的苏打机 Internet 界面. 1991 年, 剑桥大学的研究人员第一次将一架用于监控咖啡壶的摄像机连接在 Internet 上. 之后, 越来越多的摄像机出现于 Internet, 通过它们提供的实时动态图像, 人们可以领略各地的风景、观赏生物或进入个人的生活空间, 真切地感受到数千里之外的真实生活^[3]. 1994 年, 美国南加州大学 Ken

* 基金项目: 中国科学院机器人学开放研究实验室基金资助项目(项目编号: RL200103).

收稿日期: 2001-03-08

Goldberg 等人第一次建立了基于 Internet 的远程控制机器人系统 Mercury Project^[4], 基于 web 的远程控制机器人由此诞生. 之后, 很多组织和机构投入了 web 机器人和其他 Internet 设备的开发和研究中. 据 NASA Space Telerobotics Program 站点统计^[5], 已有 20 多个远程控制机器人连接于 Internet.

web 技术和远程机器人控制技术的结合由以下的因素促成:

首先, 传统的机器人操作系统需要建立特殊的操作站, 铺设专用线路, 硬件设备极其昂贵, 因此其应用范围在一定程度上受到限制. 现有的网络设施提供了价格低廉的通信线路, 作为系统构架, 大大降低了操作系统的成本. 并且, 以 HTTP 作为远程机器人控制系统的标准通信协议, 使基于 web 开发的远程机器人控制系统软件具有良好的可移植性和互用性.

其次, Internet 增加了人们远程交流的机会, 人们已习惯于通过 Internet 交换文本、图片或声音, 甚至还可以通过控制 Internet 上的摄像机的旋转来获取不同角度的图像. 但是, 与现实的人类接触相比, 这些远程行为还相当局限. 真正要实现物理意义上与远程地点的交互, 还是离不开象机器人这样的智能设备. 基于 web 的远程控制机器人为我们提供了对人类行为的远程实现的研究机会^[6].

2 国内外研究现状 (Research status)

在基于 web 的远程控制机器人研究领域, 美国、澳大利亚、瑞士、日本、德国的高校和研究组织最为活跃, 为 Internet 添加了许多创造性的机器人控制站点.

Mercury Project 是第一个基于 web 的远程机器人控制系统. 在这里, 用户通过远程控制一台 IBM SCARA 型机器人, 观察和挖掘埋藏于沙土中的藏品^[7]. 不久, 1994 年 9 月, 西澳大利亚大学的 Kenneth Taylor 等人将一 6 自由度的 ASEA IRb-6 型机器人手连接到 Internet, 这就是搬运和搭建积木的 Telerobot^[8]. Telerobot 是早期基于 web 的远程机器人控制系统的典范. 用户可以填写 HTML 表单, 在反馈的机器人工作区图像上直接点击, 高级用户还可以输入系列连续的移动指令, 以向机器人发送请求指令. 服务器端的 CGI 脚本处理用户的请求, 分别与机器人控制服务器和图像服务器通信, 控制机器人的移动, 并在机器人完成任务时, 返回当前位置的不同角度的图像. 之后, 更多有创意的 web 机器人站点出

现在 Internet 上. 如: 英国 Bradford 大学的远程的机器人望远镜系统; 南加州大学可播种和浇水的远程花园 Telegarden; 澳大利亚 Wollongong 大学拾取木块的 Roboty; 德国以“Hanoi 塔”方法搬运木块的 Net-Robot; 加州大学 Berkeley 分校的 PRoP (Personal Roving Presence) 等等^[5].

值得一提的是基于 web 的远程控制机器人与艺术的结合. 美国 Wilkes 大学把一台 PUMA 760 机器人连接到 Internet, 在这个站点, 用户可以使用画笔和颜料在画架上绘画. Java applet 为用户提供了虚拟的画布, 用户在模拟的画布上点击和拖动鼠标操作, 甚至可以指定颜料的饱和程度及画刷在画布上的用力情况. 用户会立即得到虚拟的图像反馈, 而所有用户的动作被存储并按顺序传至机器人. 机器人对动作的执行会迟于用户的模拟, 这是一个非同步的间接执行的系统^[9]. 南加州大学的 DISMUSE 项目也是与艺术博物馆合作而开发的, 通过它, Internet 上的用户可以从任意方位观察博物馆的雕塑作品, 如身临其境^[10].

Internet 上另一类活跃的远程控制机器人是自主式移动机器人, 它的自主性和移动性的特点将在更高程度上满足人们对远程空间探索的要求, 并为最终与非结构化的、未知的远程环境的交互提供了研究平台. 基于 web 的远程自主式移动机器人系统各有特色. 瑞士联邦工学院的 KhepOnTheWeb^[11] 是第一个基于 web 的远程自主式移动机器人系统. 用户不但可以控制机器人 Khepera 的位置和速度, 还可以通过对摄像机旋转角度及镜头伸缩的控制得到需求的图像反馈. 美国 Carnegie Mellon 大学的 Xavier 穿行于实验室和教室之间^[12], 如果用户给出本人的 e-mail 地址, 它会在到达目的地之后通知用户, 并包含图片或最拿手的碰-碰笑话. 德国 Bonn 大学开发了用于博物馆导航的 Rhino 和 Minerva^[13] 和 NASA 的火星极地登陆者 Mars Polar Lander^[14] 则在基于 web 的远程自主式移动机器人的两大主要应用领域进行了积极的尝试.

目前, 国内已开始了基于 web 的远程控制机器人系统方面的研究, 但尚未出现基于 Internet 的机器人控制站点.

3 主要研究问题 (Main issues)

与传统操作系统不同, 基于 web 的远程机器人控制系统以 Internet 为构架, 因而面临着如下的新问题:

(1) 时间延迟问题

由于受带宽和网络负载变化的影响, 网络的长时间延迟具有不确定性. 传统的遥操作一般假设固定或约定的延迟和数据通过率, 人工闭环控制是最早也是研究较成熟的一种控制形式, 在这种方式下, 操作员是控制回路的一部分. 但当通信过程中产生显著的、时变的时间延迟时, 系统不稳定情况出现, 人工闭环控制不再适用. 为避免系统不稳定性, Sheridan 提出了由本地控制回路和操作人员共同完成对机器人或设备的控制的监督控制方案(supervisory control scheme). 这一方法曾被广泛应用, 如 ROTEX 空间机器人技术实验. 西澳大利亚大学的 Telerobot 系统也采用了这一方案^[8]. 一直以来, 许多针对网络时延的理论和方法被陆续提出, 但目前没有很好的解决方案.

由于网络时延问题, 要求系统不能因长时间延迟而受损或崩溃. 因此系统应具有高度的自主性和鲁棒性, 并要求尽量减少数据传输的数量, 以确保在网络阻塞的情况下服务客户.

(2) 界面设计问题

传统遥操作中, 一般只有受过培训的专业操作人员才能获得操作这些机器人的“特权”, 对界面的设计没有特别的要求. 但是基于 web 的远程控制机器人面对没有经验、对机器人控制可能一无所知的非专业人士, 界面的设计就成为系统设计中重要的考虑因素, 将影响用户的操作行为和站点的受欢迎程度.

界面设计应力求简单, 一目了然, 易于理解和操作. Siegwart^[15]提出“连接即运行”(connect and play): 冗长的介绍可能会吓退用户.

(3) 系统安全性问题

与其它 Internet 站点一样, 基于 web 的远程控制机器人控制站点也要面对网络上潜在的恶意攻击. 因此, 在系统建立时, 安全性是必然要考虑的问题.

4 系统结构及实现 (System structure and implementation)

基于 web 的远程控制机器人系统多采用客户/服务器(Client/Server)结构. 其基本的系统构架如图 1 所示.

Internet 上任意地点的用户通过浏览器中的 web 界面发出请求. 当前多数基于 web 的远程机器人控制站点均采用 CGI(Common Gateway Interface 公用网关接口)实现其 HTTP 服务器功能. HTTP 服

务器在接收到用户请求后, 将激活一个或多个 CGI 应用程序, 与机器人服务器、数据服务器和图像服务器通信. 机器人服务器控制机器人到达指定位置, 并将得到的机器人当前位姿、命令执行情况等返回 HTTP 服务器; 数据服务器可存储用户的注册信息, 在使用“成员和访问者”(“member and guest”)方式时, 提供用户的登陆、身份验证等服务; 而在需要对用户的命令排队的系统中, 提供指令的存储和处理. 数据服务器的另一大重要功能是记录用户的登陆、操作情况和留言, 作为日后对用户操作行为和站点改进的依据. 图像服务器通过图像采集卡抓取图像, 并可根据用户的需求调整摄像机的旋转角、放大率, 或返回不同尺寸的图像.

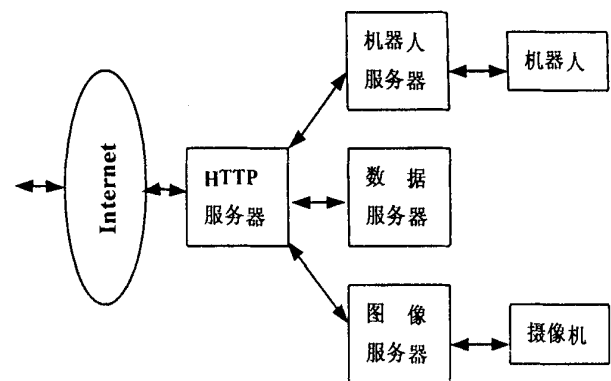


图 1 基于 web 的远程控制机器人系统的基本构架

Fig. 1 Structure of web-based telerobot system

(1) 界面的设计

最早的基于 web 的远程机器人控制系统的客户界面多采用 HTML 语言设计, 用户通过填写 HTML 表单或点击机器人工作区的图像发送指令, 功能有相当的局限. 当涉及多步移动时, 需要利用脚本语言, 如跨平台的、由事件驱动的脚本语言 JavaScript. 它可以提供客户端的部分数据处理能力, 扩展了客户端功能, 降低了与服务器端通信的代价.

Java 的应用, 使复杂但直观的用户界面的设计成为可能. Java 提供了丰富的 GUI 类库以设计友好的用户界面, 比如, 用户可以通过鼠标的拖动确定机器人的目的位姿. NASA 利用 Java 技术设计了复杂的火星计划的界面 WITS (Web Interface for Tele-science)^[14].

Java 还利于用户操作的事先模拟. 根据用户运动命令的传输和执行, 遥操作系统可被分为两种类型. 第一种, 直接类型, 操作员直接发送指令控制真实的机器人; 第二种, 间接类型, 用户通过在虚拟环境的模拟规划运动, 然后发送给机器人执行^[16]. Java

使间接型系统中系列模拟指令的存储成为可能,如上文提到的 PumaPaint 项目.日本的 Hirukama 等人也利用 Java 和 VRML(虚拟现实标记语言)设计了部件组合系统^[16].在窄带宽的情况下,Java applet 的下载和执行速度会受到影响,但随着网络设施的改善,Java 在客户端的应用是趋势所在.

界面设计中的另一个问题是:对于用户来说,运动学、奇异点和工作区边界等问题应不可见,即降低复杂性和传输数据.比如,6自由度的机器人,位姿需要6个参数表示,其中姿态角的表示有摇摆、俯仰和偏转.在澳大利亚的 telerobot 中,姿态角的表示被减少为两个,即只要指定操作手绕 z 轴的旋转(sp in)和与 z 轴的夹角(tilt),更容易理解,并减少了数据传输量^[8].同样,对于移动机器人,只要传递(x, y, θ)三个参数即可.

(2) HTTP 服务器

当前基于 web 的远程机器人控制站点的 HTTP 服务器多采用 CGI 编程设计. CGI 的功能是在超文本文件和服务器主机应用程序之间传递信息.一个用户请求激活一个 CGI 程序,该程序收集 HTML 表单或 Java applet 包含的数据,并将处理结果返回给用户. CGI 已能满足多数 web 机器人站点的需要.

一个 CGI 程序只能处理一个客户请求,因此每个新的客户请求都要激活一个新的 CGI 进程,当用户请求增多时会挤占大量的系统资源,执行效率低下.并且,在机器人应用中,往往需要服务器扮演主动的角色,如控制与客户端的通信、客户之间的通信、主动向客户发送更新的数据和图像时, CGI 无能为力.因此,基于 Java 的服务器将是一个好的替代品.在瑞士联邦工学院的“Mobile on the web”项目中,已采用 100% 纯 Java 编写服务器程序^[15].

(3) 图像反馈

视觉反馈是有效的远程控制的重要前提.每个 web 机器人站点都提供了图像反馈.并且大多数站点安装了多只摄像头,用户通过操纵可以得到多个角度的视觉反馈.图像反馈中的问题是:(一)图像数据的有效压缩或选择局部区域的图像反馈,以减少数据传输量.(二)服务器向客户传送实时更新图像的问题.许多站点采用了服务器“push 技术”,但这一技术只被 Netscape Navigator 浏览器所支持.更有效的解决办法是采用 Java 服务器与客户端的 applet,二者的连接是可控的.这一方案在“Mobile on the web”项目中得到应用^[15].

(4) 用户管理

web 机器人站点面对的是多个 Internet 客户和有限的机器人装置.如何对用户进行管理是使用户得到满意控制的重要因素,采用的方式根据系统的多样性而不同:

i) 一个用户,一个机器人

在这种情况下,当前只有一个用户控制机器人.对用户可采用排队机制,为每个用户规定一定的控制时间^[7,8];或抢占机制,在当前无用户操作时接受新用户的控制请求.

另一种方式是将用户的指令进行排队.在 NASA 的 WITS 系统中,设计了专门的排队工具,将用户的指令排队执行^[14];Xavier 则会在机器人不可控或离线时,收集用户的控制指令并排队,在执行完指令之后以 e-mail 通知用户^[12].

ii) 多个用户,一个机器人

民主表决(voting)的方式:在这种方式下,用户通过表决决定机器人的运动方向.例子之一是 NASA 和 Carnegie Mellon 大学合作的 Atacama 沙漠之旅项目^[17];另外的应用是博物馆的导航机器人 Rhino^[13].该方式的不足之处在于不能满足每位用户的要求.

分布式协作:多位用户同时连接,一名用户操作,其它用户观察,可以得到操作者的控制信息;或多名用户通过客户间的通信交流,实现协同操作(collaboration). NASA 的 WITS 系统已实现了分布式协作^[14],西澳大利亚大学也在进行这方面的研究^[18].

5 发展趋势 (Trends)

目前,不同的研究组织正致力于多方面的研究,以期使基于 web 的远程控制机器人技术更加完善.

(1) Java 技术的应用

Java 在客户端的应用已得到广泛的肯定,而服务器端的 Java 编程将会提供更灵活、快捷的服务. Java Servlet、socket 或 RMI(Remote Method Invocation 远程方法调用)都将成为取代 CGI 以提供更加有效的客户/服务器通信的方法.

(2) 分布式应用

分布式应用有两个主题,一是用户间的分布式协作,二是分布于 Internet 的多机器人控制系统的建立.即多用户,单机器人系统和单/多用户,多机器人系统的研究.[14],[15]和[18]已分别做了这些方面的工作.

(3) 虚拟现实技术在远程再现中的应用

虚拟现实(Virtual Reality)技术就是让用户在人工合成的环境里获得“进入角色”的体验,为用户提供了对世界的更逼真的感受.它也是远程呈现(telepresence)的前沿问题.NASA 的火星计划实现了远程登陆点的三维重建,并证明远程地点的三维再现提供的友好界面是二维图像不可比拟的,它增加了用户对远程控制的真实感受^[17].

(4) 遥操作的理论研究在基于 web 的基础之上的扩展与改进.

这包括传统的基于固定延迟、系统稳定情况下遥操作的各种方法在 Internet 环境下的应用,如对延迟的补偿^[19]、力矩反馈遥操作系统的研究^[20]等等.

6 应用前景及结论 (Application and conclusion)

基于 web 的远程控制机器人系统的建立:(一)可借助现有的 web 技术,不必象专用的遥操作系统的建立要从底层开始,(二)无须复杂的专家界面和通信硬件.因此,当达到足够满意的带宽,基于 web 的远程控制机器人系统具有相当的优势,并适合于传统的远程控制机器人的应用领域,如航空、开采和 underwater 远程操作运载工具(ROVs)等.比如,NASA 的 2001 火星漫游者计划应用了 web 界面^[21],避免了科学家驱车到加州的控制中心操作火星机器人,并减少了线路和控制中心的各种开支.

另外,基于 web 的远程控制机器人系统的一大特点是可以被连接到 Internet 上的任何地点的任何人所访问,因此它也开辟了传统遥操作系统力不能及的新的应用领域.如:(1)远程制造:美国加州大学 Berkeley 分校的研究组织正在开发可通过 Internet 使用的机械加工服务,名为 CyberCut^[22].(2)教育培训:通过网络共享机器人或其它昂贵的设备,可节省教育和培训的费用.此外,研究机构也可以通过共享,测试不同的机器人控制算法,促进研究和交流.许多基于 web 的远程机器人控制站点就是在此目标上建立起来的,如:KhepOnTheWeb, PumaPaint 和 Xavier 等.(3)娱乐:大多数目前的基于 web 的远程机器人控制站点提供了这一功能,并证明受到了广大 Internet 用户的关注和喜爱.

基于 web 的远程控制机器人的研究内容广泛,它既借鉴了遥操作和网络技术的理论和方法,又拓展了新的研究领域,具有相当的研究和应用前景.

参考文献 (References)

- [1] Ken Goldberg. The Robot in the Garden: Telerobotics and Telepresence in the Age of the Internet-Chapter 1: Introduction. MIT Press, 2000
- [2] http://raier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/
- [3] <http://ford.ieor.berkeley.edu/ircameras.html>
- [4] <http://www.usc.edu/dept/raiders/>
- [5] http://raier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/realrobots.html
- [6] Eric Paulos, John Canny. PRoP: Personal Roving Presence. ACM SIGCHI, 1998
- [7] Ken Goldberg 等. The Mercury Project: A Feasibility Study for Internet Robots. IEEE Robotics & Automation magazine. March 2000, 35- 40
- [8] Kenneth Taylor, Barney Dalton. Internet Robots: A New Robotics Niche. IEEE Robotics & Automation magazine. March 2000, 27- 34
- [9] Matthew R Stein. Interactive Internet Artistry. IEEE Robotics & Automation magazine, June 2000, 28- 32
- [10] S Goldberg 等. DISMUSE: An Interactive Telerobotic System for Remote Viewing of Three-dimensional Art Objects. Proc IEEE Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems (IROS): Workshop on Web Robots, Victoria, Canada, 1998
- [11] Patrick Saucy, Francesco Mondada. KhepOnTheWeb: Open Access to a Mobile Robot on the Internet. IEEE Robotics & Automation magazine, March 2000, 41- 47
- [12] Reid Simmons 等. Lessons Learned from "Xavier" IEEE Robotics & Automation magazine, June 2000, 33- 39
- [13] Dirk Schulz 等. Web Interface for Mobile Robots in Public Places. IEEE Robotics & Automation magazine, March 2000, 48 - 56
- [14] Paul Backes, Jeffrey Norris. Mars Rover mission Distributed Operations. TMOd Technology and Science Program News, June 2000
- [15] Roland Siegwart. Guiding Robots through the Web. Proc IEEE Int Conf On Intelligent Robots and Systems (IROS): Workshop on Web Robots. Victoria, Canada, 1998
- [16] Hirohisa Hirukawa, Isao Hara. Web-Top Robotics. IEEE Robotics & Automation magazine June 2000, 40- 45
- [17] Peter Coppin 等. Big Signal: Information Interaction for Public Telerobotic Exploration. Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation (ICRA): Workshop on Current Challenges in Internet Telerobotics, Detroit, MI, 1999
- [18] Barney Dalton, Ken Taylor. Distributed Robotics over the Internet. IEEE Robotics & Automation magazine, June 2000, 22- 27
- [19] Kevin Brady, Tzyh-Jong Tarn. Internet-based Remote Teleoperation. Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation (ICRA): Workshop on Current Challenges in Internet Telerobotics, Detroit, MI, 1999
- [20] Günter Niemeyer, Jean-Jacques E Slotine. Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet. Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation (ICRA): Workshop on Current Challenges in Internet Telerobotics, Detroit, MI, 1999
- [21] <http://robotics.jpl.nasa.gov/tasks/wits>
- [22] <http://CyberCut.Berkeley.edu>

作者简介:

耿海霞 (1977-), 女, 硕士研究生. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

陈启军 (1966-), 男, 副教授. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

王月娟 (1935-), 女, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制与智能控制.