

文章编号: 1001-0920(2003)01-0040-05

基于 Agent 的遥操作机器人控制器研究

彭 刚, 黄心汉

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 研究网络环境下基于 Agent 的遥操作机器人控制器结构, 提出了人/智能体/机器人(M/A/R)模型。探讨了基于 Agent 的机器人控制器的体系结构和功能, 介绍了采用任务规划和反应式行为的复合机器人控制系统。对意外事件的处理和运动轨迹的规划实验表明, 这种遥操作机器人控制器能提高系统的实时性、可靠性和对环境的适应性。

关键词: Agent; 遥操作机器人; 反应式行为; 模糊推理; 网络

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Agent-based robot controller with application to telerobotics

PEN G Gang, HUANG Xin-han

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The M/A/R (Man/Agent/Robot) architecture in telerobotics of agent-based robot controller using multi-sensor fusion is presented. An instance system combines task planning and reactive behavior control to implement exception handling and planning of trajectory in a telerobotics platform via network. The real-time, reliability and flexibility to environment are improved in telerobotics of agent-based robot controller using multi-sensor information fusion.

Key words: Agent; Telerobotics; Reactive behavior; Fuzzy reasoning; Network

1 引 言

近年来, 基于网络的机器人遥操作研究取得了很大进展。例如西澳洲大学的 Telerobot 系统^[1], 美国南加州大学的 Mercury 项目^[2]和 TeleGarden 项目^[3], Berkeley 大学的 Mechanical Gaze 系统^[4], 英国 Bradford 大学的 Robotic Telescopes^[5]等。这些基于网络的机器人遥操作系统改变了传统点到点的机器人控制方式, 操作者可以通过网络控制远端的机器人, 就象在现场亲自操作一样。从而为机器人遥操作提供了一种崭新的人机交互环境, 使传统的机器人遥操作技术在结构和方式上发生重大的变革。

由于网络延时所具有的可变性和不可预测性, 传统的机器人遥操作控制方式无法直接应用于网络

环境。目前, 基于网络的遥操作机器人控制结构可分为直接控制^[6]、共享控制^[7]、监督控制^[8]、合作控制^[9]、混合控制^[10]等。

本文提出一种基于 Agent 的遥操作机器人控制器模型, 即人/智能体/机器人(M/A/R)模型。遥操作者不是直接控制机器人, 而是与基于 Agent 的机器人控制器进行交互, 间接地去控制机器人。同时, 基于 Agent 的机器人控制器运用多传感器信息融合技术, 使得具有较强实时性要求的目标识别与定位、装配作业、轨迹规划、意外情况处理, 能在本地自主地执行, 以提高对环境的适应性。当需要人来参与决策时, 遥操作用户才参与进来, 从而提高了系统的智能水平。

收稿日期: 2001-12-28; 修回日期: 2002-03-18

作者简介: 彭刚(1973—), 男, 湖北武汉人, 博士后, 从事遥操作机器人、人工智能等研究; 黄心汉(1946—), 男, 湖北咸宁人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人控制等研究。

2 系统描述

基于网络的机器人遥操作系统结构如图 1 所示。它主要包括校园网、MoveMaster-EX 机器人、场景摄像头、手眼摄像头、超声波测距仪、6 维腕力传感器、遥操作服务器、遥操作界面以及输入设备等。遥操作用户可通过有关输入设备, 如游戏杆或 3D 鼠标等, 控制机器人的运动和手爪的张合, 完成诸如抓取物体、插轴入孔等装配作业。还可通过基于 OpenGL 的机器人 3 维图形仿真系统, 对遥控命令进行运动学仿真, 以提高系统的可靠性和安全性。

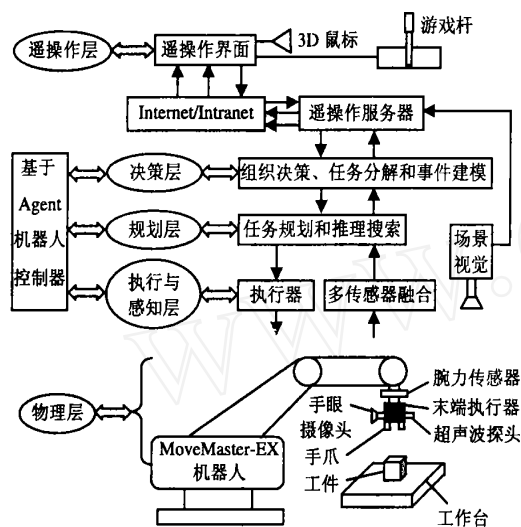


图 1 机器人遥操作系统结构

系统分为遥操作环、网络环和本地环, 采用 M/A/R 模型。该模型可分为 5 层: 物理层、执行与感知层、规划层、决策层和遥操作层。其中第 2~ 第 4 层构成了基于 A gent 的机器人控制器。作为人与机器人交互的代理, 一方面接收操作者的任务命令, 代理用户控制机器人, 并将机器人和环境的状况信息通过网络传送给遥操作者。另一方面, 作为一个自主的智能实体, 以多传感器信息融合技术为基础, 将时间、空间、可信度、表达方式等不尽相同的信息进行融合处理, 以增强系统在各种复杂、动态、不确定环境中的自主能力和适应能力, 完成遥操作任务的调度、规划和实时控制等。

3 基于 A gent 的机器人控制器结构设计

在基于网络的机器人遥操作系统中, 机器人控制器要能代理远程用户控制机器人, 必须具有良好的交互能力。另外, 遥操作机器人系统常用于核能工厂、深海与太空探索以及地雷挖掘等危险环境, 这些环境的复杂性和不确定性影响了机器人对外界环境

的感知能力和适应能力。因此, 在基于网络的机器人遥操作系统中, 采用基于 A gent 的方法对机器人控制器进行“封装”, 并运用多传感器融合技术, 以提高机器人对所处环境的感知能力和实时任务处理能力, 增强对环境的适应性。

3.1 基于 A gent 的机器人控制器构成

A gent 具有感知能力和问题求解能力, 并能与外界进行通信^[1]。基于 A gent 的机器人控制器模型可表示为一个 5 元组结构: {通讯交互, 数据库和知识库, 推理规划, 感知器, 执行器}, 即 $\{S, R\}, \{D, K, G\}, \{I, M\}, P, E$ 。其中: $\{S, R\}$ 表示传送和接收协议, $\{D, K, G\}$ 表示 A gent 的数据库、私有知识和全局知识, $\{I, M\}$ 表示推理机制和方法, P 代表感知器, E 代表执行器。

例如要对场景中的一个工件进行抓取操作, 则抓取任务可描述为: 基于 A gent 的机器人控制器根据数据库 D (如工件的大小、形状等信息) 和知识库 K, 通过推理机制 I, 运用 K 和 G 来决定方法 M。其中: M 定义了机器人抓取工件的方式; 私有知识库 K 定义了机器人应满足的各种物理定律和规则, 包括运动学、动力学等数值型模型以及机器人的能力、状态等非数值型模型; 全局知识库 G 则包含了系统环境模型和应遵守的约束条件等。

3.2 决策层

决策层提供了对任务、资源和需求等之间关系的全面描述。它先将远端操作者的任务命令翻译成统一规范化的语言, 然后根据系统资源状况, 组织决策和分解任务, 建立各个任务之间的联系, 进行任务调度。当同一时刻出现多个遥操作任务命令时, 决策层命令缓冲机制和协调控制, 选择机器人当前所要执行的任务命令, 避免冲突。

3.3 规划层

规划层是机器人控制的关键功能部分, 其作用在于规划任务和搜索推理。规划层为每一操作加以适当的优先级和时间要求, 建立起各任务的执行计划, 从而决定任务执行的时序关系。但当遇到某些意外情况时, 例如在运动中遇到障碍物, 往往需要进行多次重新规划, 不仅消耗大量的计算时间, 而且由于实时性较差, 可能影响遥操作机器人系统的可靠性和安全性。因此, 在基于 A gent 的遥操作机器人控制器规划层中, 必须加入反应式行为控制, 以处理各种意外事件, 直接对命令进行修改, 而不是重新对任务进行规划。

规划层包括遥操作任务规划模块、本地实时任

务规划模块和本地反应式行为规划模块。现分别描述如下:

遥操作任务规划 := {(遥操作者标识 机器人标识 时间戳 优先级 任务标识 确定或取消)(终止当前任务 建立系统新任务)(停止规划进行修改 重新规划 故障信息)};

本地实时任务规划 := { 视觉定位任务标识: 移动到第 1 点 | 图象获取并处理 | 移动到第 2 点 | 图象获取并处理 | 复位 超声定位任务标识: 移动到物体上方 | 测距 | 复位 抓取任务标识: 移动到物体上方 | 插入 | 关闭手爪 | 把持 | 移动到期望点 | 松开手爪 | 复位 ...};

反应式行为规划 := {(信息流 激活条件)(命令标识 优先级 确定或取消)(发送动作命令代码 动作执行)(位置矩阵 速度矩阵 ...)}.

3.4 执行与感知层

执行层在功能上相当于传统的机器人控制器。它进行坐标变换、运动学和动力学计算,产生控制变量,经执行机构——机器人执行实际的动作,完成遥操作用户的任务。感知层以多传感器信息融合技术为基础,利用 6 维腕力传感器、超声波测距仪、手眼摄像头、场景摄像头等多个传感器的冗余和互补的特性,获取机器人、被操作物体及所处环境动态变化的较为完整的信息,并做出实时响应。

4 研究实例

在基于网络的机器人遥操作系统中,由于网络延时的存在,使得遥操作者不能对本地环境做出实时响应。为提高基于 Agent 的机器人控制器处理实时任务和各种意外事件的能力,系统采用任务规划的“前馈”和反应式行为规划的“反馈”,构成复合结

构的系统,如图 2 所示。

任务规划包括遥操作任务规划和本地实时任务规划。遥操作任务规划用于执行遥操作者下达的任务;本地实时任务规划在特征级和决策级实现手眼立体视觉和超声波测距的工件识别、定位和抓取。而反应式行为规划在数据级以 6 维腕力传感器为基础,检测意外事件(如遇到障碍物,与工件发生碰撞),以提高系统实时处理意外事件的能力和对环境的适应能力。

4.1 基于 6 维腕力传感器的反应式行为控制

基于 6 维腕力传感器的反应式行为控制设置在中断服务程序中,效率高,实时性强。当 6 维力/力矩满足反应式行为触发条件时,便激活 6 维腕力传感器的各种反应式行为。触发条件为

$$f(k) - f(k - 1) > \alpha \quad (1)$$

其中: $f(k)$ 为当前时刻由 6 维腕力传感器测得的 6 维力/力矩, $f(k - 1)$ 为上次测得的 6 维力/力矩, α 为阈值,改变 α 值可改变 6 维腕力传感器反应式行为对力/力矩的敏感度。

下面讨论在进行工件的识别、定位和抓取过程中,基于 Agent 的机器人控制器反应式行为的处理过程。

在未抓到工件时,机器人末端执行器处于空载状态,如图 3(a) 所示。当机器人处于运动状态时,若末端执行器遇到障碍物,则 6 维力/力矩的变化

$f(k) - f(k - 1)$ 迅速上升,很快超过了阈值 α ,如图 3(b) 所示。这时,处理意外情况的反应式行为模块检测到有障碍物,便被激活并开始进行处理,改变运行的轨迹,使 $f(k) - f(k - 1)$ 快速减少。最后,末端执行器绕开障碍物,继续向前运动,反应式行为控制的作用也随之结束。

如果定位不准确,当机器人末端执行器抓取工件时,就可能与工件发生接触。若不采取措施,末端执行器和工件便可能损坏。这时,反应式行为模块被激活,末端执行器向后退,并通知推理规划模块,重新进行立体视觉和超声波测距的工件定位工作。若机器人末端执行器抓空,则 6 维腕力传感器的输出维持不变,也要重新进行工件的定位。

当末端执行器抓到工件时,重力 f_g 的变化情况如图 3(c) 所示。如果末端执行器未能握紧使工件脱落,并且重力 f_g 方向的力突然减少,则反应式行为模块检测到重力的变化并进行处理,如图 3(d) 所示。图中线段 3 表示处理意外情况的反应式行为模块,通过立体视觉和超声波测距重新进行工件的定

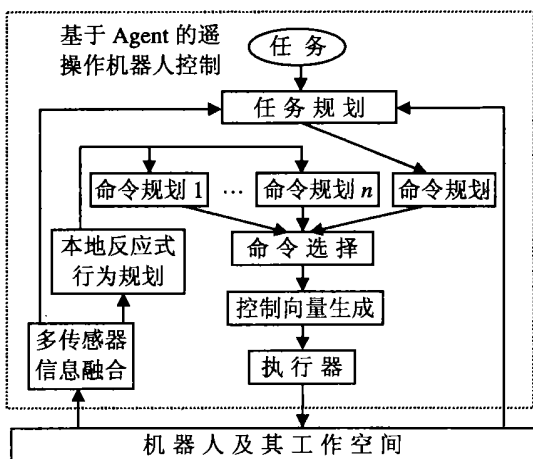


图 2 复合控制系统实例

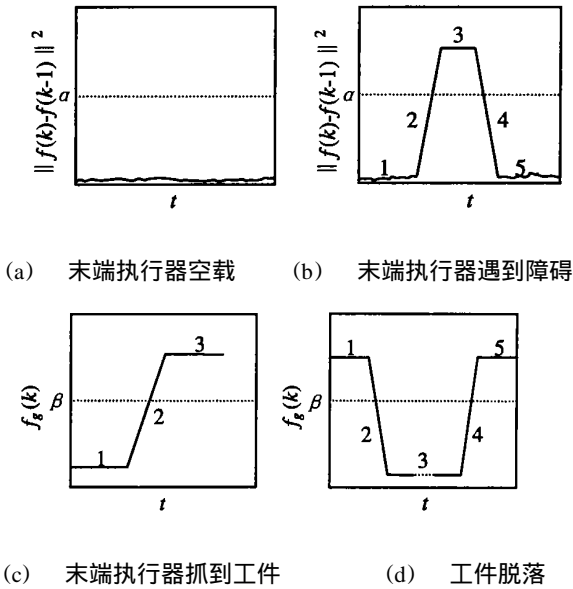


图 3 6 维腕力传感器的输出变化曲线

位与抓取。

这种基于 6 维腕力传感器的反应式行为控制器实时性强, 能根据环境的反馈信息, 及时修改自身的行为规则, 体现了 Agent 系统对环境的适应性, 增强了系统的安全性和可靠性。

4.2 基于模糊推理的轨迹规划

在进行机器人遥操作工件抓取时, 必须对运动轨迹曲线进行逐段分解, 将机器人的运动轨迹分解成一个个微小的运动序列。分解得过少, 定位精度差; 分解得过细, 运动时间增大, 定位作业的效率降低。本文运用模糊推理技术, 模仿人在进行定位轨迹规划时的思维方式进行轨迹规划, 对定位曲线进行分解, 自动生成机械手的控制向量。它既能保证定位精度, 又不降低效率。

下面以 x 坐标的调整为例, 介绍这种基于模糊推理的机器人运动轨迹分解算法。

4.2.1 输入

设 $G-\Delta x$ 表示当前位置 $x(k)$ 与目标位置 x_g 之间距离的大小; $G_R-\Delta x$ 表示经过调整后, 当前位置与目标位置之间距离的变化率, 即向目标位置靠近的快慢程度; Q_1 和 Q_2 为量化因子。则有

$$G-\Delta x = |x(k) - x_g| / Q_1 \quad (2)$$

$$G_R-\Delta x = |G-\Delta x(k) - G-\Delta x(k-1)| / Q_2 \quad (3)$$

将 $G-\Delta x$ 和 $G_R-\Delta x$ 的论域分成 6 级, 分别为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 用模糊语言表示为: 大(B), 中(M), 小(S)。其设计原则为: 当前位置与目标位置距离大时, 采用分段线性化的正态分布形隶属函数曲线, 这样步距调整的幅度大, 使机械手快速向目标位置靠

近; 当距离减小时, 模糊变量取“中”, 采用平坦的梯形隶属函数曲线, 这样调整的幅度适中, 既有利于减少调整次数, 又不会跳过目标位置; 当机械手靠近目标位置时, 模糊变量取“小”, 使步距调整的幅度较小, 这样既可保证机械手的定位精度, 又不降低轨迹规划效率。

4.2.2 模糊推理

推理规则是由模糊语言和模糊逻辑组成的模糊条件语句。其确定原则为: 当前位置与目标位置的距离 G 大时, 调整的幅度大, 尽快向目标位置靠近; 当距离变小时, 调整的幅度较小, 逐渐向目标位置靠近, 不致于跳过目标位置。模糊规则的基本形式如下

IF $G = B$ and $G_R = B$ THEN $F = SA$

IF $G = B$ and $G_R = M$ THEN $F = MA$

...

IF $G = S$ and $G_R = M$ THEN $F = MC$

IF $G = S$ and $G_R = S$ THEN $F = SC$

4.2.3 输出

模糊推理机构输出量 F_x 的论域分为 15 级, 分别为 $\{1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8, 7/8, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 。用模糊语言表达可分为 7 档: 大放大(BA), 中放大(MA), 小放大(SA), 保守调(O), 小缩小(SC), 中缩小(MC), 大缩小(BC)。其模糊隶属函数如图 4 所示。

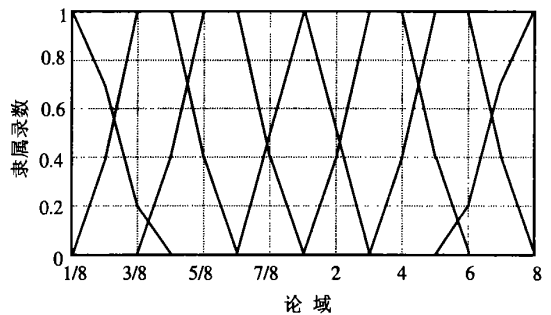


图 4 输出量的隶属函数

4.2.4 运动轨迹分解

分解算法如下: 根据当前位置与目标位置之间距离的大小及距离的变化率, 通过模糊推理算法, 生成新的机器人运动轨迹矢量。例如 x 坐标的步距调整公式为

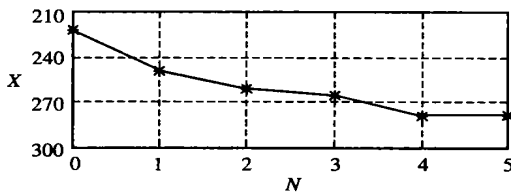
$$X(k) = X(k-1) + D_x(k) \quad (4)$$

$$D_x(k) = Q_x F_x(k) \quad (5)$$

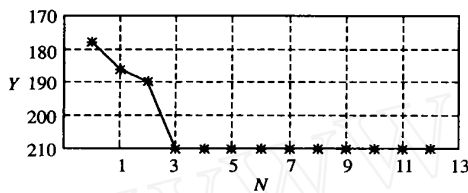
其中: $D_x(k)$ 为调整量, Q_x 为数量级因子, $F_x(k)$ 为模糊推理机构的输出结果。

在轨迹规划过程中, 末端执行器位置坐标的变

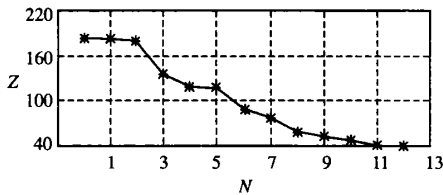
化情况如图5所示。末端执行器的初始位置为(225, 178, 180), 定位目标的位置为(280, 210, 40)。在调整过程中, 当前位置与目标位置相距较远时, 向目标位置值收敛较快; 当前位置接近目标位置时, 向目标位置值收敛较慢。模糊推理机构在考虑距离缩小的同时, 还根据向目标位置靠近的快慢程度, 选取合适的步距调整量。



(a) X 坐标的变化



(b) Y 坐标的变化



(c) Z 坐标的变化

图5 基于模糊推理的位置坐标变化情况

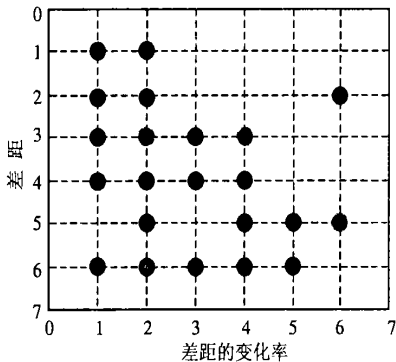


图6 步距调整量在模糊推理表中的取值分布

位置坐标的步距调整量在模糊推理表中的取值分布如图6所示。它主要分布在左下部分, 这与模糊推理规则相吻合。实验表明, 这种基于模糊推理的机器人运动轨迹分解算法是快速、有效和可行的。

5 结 论

本文介绍一种基于Agent技术的机器人控制器结构模型, 在高层采用任务规划, 在低层采用反应式行为控制, 实现对工件的识别、定位和装配以及运动轨迹的规划和意外事件的处理。这种基于Agent的机器人控制器将任务的决策、规划、实时执行以及环境的感知集成起来, 不仅具有传统机器人控制器的内部控制和伺服驱动的功能, 而且具有开放式结构、环境感知、对外通讯交互、决策和规划等功能。它是一个自主智能实体, 能根据环境的变化及时修正自身的行为规则, 体现了Agent系统对环境的适应性, 适用于基于网络的机器人操作系统。

参考文献(References):

[1] Taylor K, Dalton B, Trevelyan J. Web-based tele-robotics[J]. *Robotica*, 1999, 17(1): 49-57.

[2] Goldberg K, Gentner S, Sutter C, et al. The mercury project: A feasibility study for internet robots [J]. *IEEE Robot Automat Mag*, 2000, 7(1): 35-40.

[3] Goldberg K, Mascha M, Gentner S, et al. Desktop teleoperation via the world wide web [A]. *IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. Nagoya, 1995. 654-659.

[4] Eric P, John C. Delivering real reality to the world wide web via telerobotics [A]. *IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. Minneapolis, 1996. 1694-1699.

[5] Mark J C, John E F B. Robotic telescopes: An interactive exhibit on the world-wide web [A]. *Second Int Conf World Wide Web [C]*. Chicago, 1994.

[6] Reberto O, Paolo F. A design and control environment for internet-based telerobotics [J]. *Int J Robot Res*, 1998, 17(4): 433-449.

[7] William s R L, Harrison F W, Soloway D L. Shared control of multiple manipulator, sensor-based tele-robotic systems [A]. *IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. 1997. 962-967.

[8] Brady K, Tarn T J. Internet-based remote teleoperation [A]. *IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. 1998. 65-70.

[9] Fong T, Thorpe C, Baur C. Collaborative control: A robot-centric model for vehicle teleoperation [A]. *Agent Auton [C]*. 1999.

[10] Backes P G, Tso K S. UM I: An interactive supervisory and shared control system for telerobotics [A]. *Int Conf Robot Automat [C]*. 1990. 1096-1101.

[11] Randall O B. A dynamical systems perspective on agent-environment interaction [J]. *Artif Intell*, 1995, 72(1): 173-216.