

# 一个监控式局部自主机器人控制器的实现与分析\*

陈 韦庆 王正志

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

**摘 要** 本文介绍了一个严格监督控制 (Supervisory control) 定义下的局部自主机器人控制器 GKD3 的设计和实现, 并从监督控制理论的角度, 对 GKD3 的体系结构和功能进行了分析和讨论。

**关键词** 机器人控制器, 监督控制, 局部自主, 体系结构

**分类号** TP242.6

## A Local-Autonomous Robot Controller Based on Supervisory Control Theory. Implementation and Analysis

Chen Jing Wei Qing Wang Zhengzhi

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** The notion of supervisory control is situated between those of manual control and autonomous control. In a sense, supervisory control means that the operator continually monitors and iteratively updates or modifies the program, the local control loop must be autonomous. This paper presents the design and implementation of GKD3, which is a supervisory-controlled local-autonomous robot controller. Based on the theory of supervisory control, we analyze GKD3's architecture and functions.

**Key words** robot controller, supervisory control, local autonomous, architecture

发展现代机器人控制系统的实践经验表明, 在现有的理论和技术水平下, 研究具备高度智能的全自主机器人的条件还不够成熟, 而研究面向特定任务特定环境的监控自主式机器人, 是一种较为现实的做法<sup>[1][2]</sup>。现代监督控制思想出现于人类探索太空的过程中。Ferrell 和 Sheridan<sup>[3]</sup>于 1967 年在美国月球车计划研究中第一次明确提出了监督控制的思想, 但到目前为止, 统一的监督控制理论尚未出现。

人工控制是早期机器人的主要控制方式, 它的特点是在操作员和任务之间形成连续的控制闭环。自主控制则与之相反, 操作员在机器人作业过程中是不起作用的, 计算机不仅闭合机器人的底层控制回路, 而且承担高层任务分解和规划功能。Sheridan<sup>[6]</sup>给出的监控严格定义为: 一个或多个操作员间断地编程且连续不断地从计算机接收信息, 计算机利用传感器和驱动器控制进程或任务环境, 负责闭环控制回路。可以看出, 监督控制的概念介于人工控制和自主控制之间, 严格的定义要求计算机使控制回路闭环, 使计算机成为一些变量的自主控制器。本文讨论的是严格定义下的监督控制。

同传统控制技术比较, 监督控制技术展示了许多优点: 它既利用了计算机精确可靠的特性, 又不牺牲人的认识能力和适应性; 闭环控制回路可以不受人的感知和行动速度的限制, 又能减轻操作员的工作负荷; 给系统提供了很强的故障检测和容错能力; 操作员无须到作业现场环境中去; 在存在大时延的情况下, 监控避开了时延引起的不稳定问题。这些优点对于极限环境下作业的智能机器人是非常重要的, 所以空间机器人领域对监督控制产生了浓厚的兴趣。著名的空间机器人项目 ROTEX<sup>[4]</sup>、FTS<sup>[5]</sup>都在其体系结构中重点考虑了监督控制功能。

\* 1997年 12月 22日收稿  
国家自然科学基金及国家 863 计划资助项目  
第一作者: 陈 韦庆, 1972 年生, 博士生

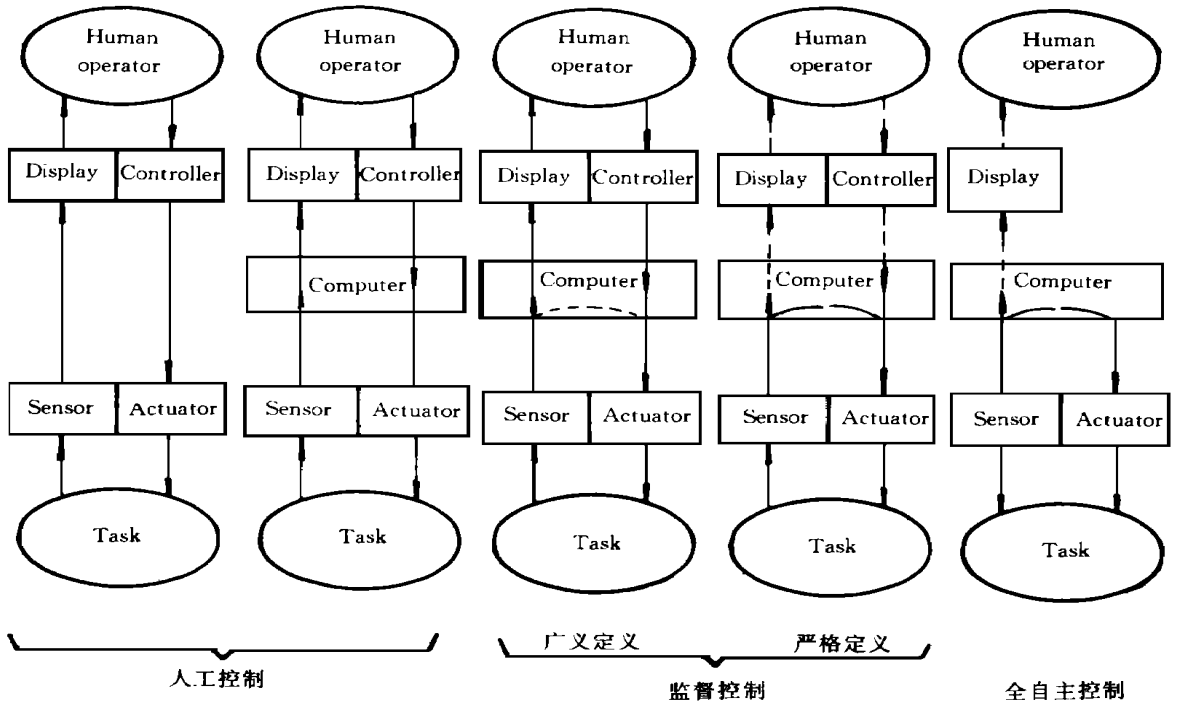


图 1 人工控制、监督控制和自主控制

NASA 研制的 FTS 系统<sup>[5]</sup>是一个配有两个作业机械手和一个固定位置用机械手及多种传感器、终端执行器的先进空间作业机器人,用于 SSF 装配和维护作业。1993 年 NASA 在终止 FTS 之前,已进行了验证遥操作预测显示技术的地面实验,其主要工作方式是交互控制模式 (traded control mode)。由 ESA 研制的基于多传感器的遥操作系统 ROTEX<sup>[4]</sup>,1993 年搭载在哥伦比亚号航天飞机上进行了空间实验。ROTEX 的操作器配备多传感器智能手爪,手爪上安装了 6DOF 腕力、抓力、触觉、微型摄像机和激光等多种传感器。在空间实验中 ROTEX 实验了以下几种控制方式:自主方式、在轨道上遥控、地面遥控、遥传感器信息编程,进行了构架机构装配、插拔 ORU 和抓取飘浮物体几个实验。结果表明,最佳控制方式是基于机器人本地传感器反馈的共享控制模式 (shared control mode)。

我们研制的新型机器人控制器 GKD3 是一个配备了多传感器,具备监督控制和局部自主能力的多任务控制器,它力图充分发挥人和计算机各自的长处,把人的智能和计算机的计算能力有效的结合起来,同时, GKD3 对于集成到更大一级系统中的问题,如空间机器人、FMS 制造单元等,也进行了考虑。

## 1 系统构成

一个成功的富有生命力的机器人控制器,应当被设计成能在广泛的自动化系统中工作,它的内部模块设计必须遵循一定的标准,并具有完备的标准外部接口。这要求研究人员重视在某种体系结构标准约束下的研制工作。我们在设计 GKD3 系统的各个模块和接口时,是以“Think Globally, but act locally”的方式<sup>[7]</sup>进行工作的,以便于最终系统的集成与测试。

### 1.1 硬件部分

GKD3 系统在硬件上大致可划分为五部分:控制计算机、机械手、计算机和机械手的接口、视觉子系统以及遥控设备,如图 2 所示。控制计算机选用的是基于 VME 总线的 Motorola 公司的 DELTA 3000 工业控制机。主机板为 M VME167 运行 UNIX 操作系统以及工业标准窗口软件 XWindows 两块运行 pSO S+ 实时操作系统的 M VME165 单板机,通过挂在 VME 总线上的 I/O 接口板(如 A/D, D/A, D/D 以及一些特殊设备模板)控制两台 PUMA 562 机械手。我们取消了原 PUMA 562 机械手的控制部分,保留了功放和安全部分,并在机械手上安装了中国科学院合肥智能所研制的 SAFMS6 维力传感器。视觉

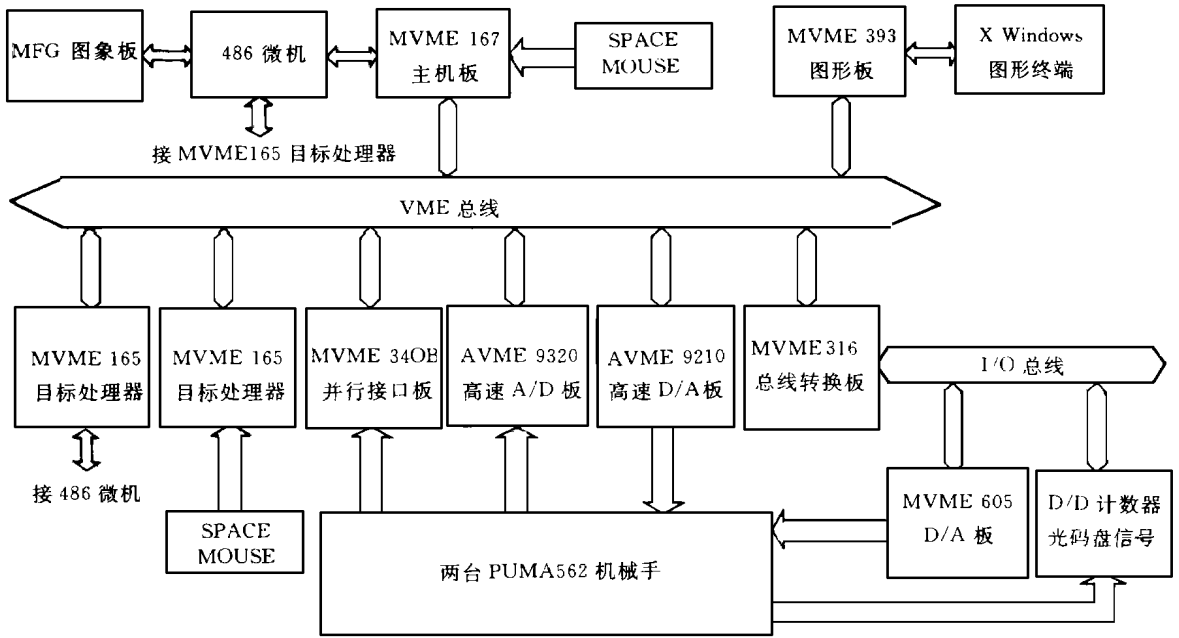


图 2 GKD3 机器人控制器硬件结构

子系统目前采用的是基于微机的 MFG 图像板, 通过串口和 DELTA 机通讯。MFG 的开发工作较为方便, 但图像处理和通讯速度仍然无法满足视觉伺服 (vision servo) 的要求, 替代 MFG 的基于 VME 总线的 COGNEX 视觉系统正在开发之中。遥控设备采用的是两套三维鼠标 (SPACE MOUSE), 它是为欧洲航天局的 ROTEX 研制的, 能提供空间 6 个自由度的完整信息。

从硬件上看, GKD3 具备了力觉和视觉的多传感器信息, 可以实现力控制和视觉导引, 使机器人具备良好的对环境的适应性; 它又是建立在工业标准总线、接口和工业标准操作系统和窗口基础上, 便于系统扩展, 既可用于工业机器人, 亦可用于移动机器人等其它类型的机器人; 遥控设备的引入, 为人工干预机制提供了强有力的手段。

## 1.2 软件部分

GKD3 软件系统可划分为四部分: 在主机、PC 机上的研究人员开发环境与操作员人机交互界面; 分布在主机、目标处理器和 PC 机上的通讯机制; PC 机上的视觉模块; 分布于主机、目标处理器上的人工干预机制

人机交互模块为 (研究人员) 利用 UNIX / X Window 的编程环境和 VMEexec 实时总线开发环境, 以及 PC 机上的视觉开发环境, 编制整个软件系统。在软件系统建成以后, 研究人员利用该模块向软件系统添加新的模块, 或在已有机器人语言和任务库不能完成作业任务的情况下, 编写新的任务。具体做法有三种: (1) 向机器人控制程序库添加开发新的作业任务程序; (2) 修改现有的模块; (3) 添加新模块。对于操作员, 该模块的作用为利用已有的任务程序和机器人动作级语言生成作业任务, 通过通讯机制下达给目标处理器执行, 并以机器人状态数据显示和闭路电视功能向操作员提供任务的执行情况。

通讯机制在 GKD3 软件系统中的作用是非常重要的。因为 GKD3 是一个多处理器系统, 处理器与处理器间的信息流动要求达到实时, 且信息种类繁多, 即使在同一处理器内部, 可能有多个任务同时并存, 所以建立起协调作用的通讯机制就显得非常重要。通讯机制分为几类: (1) VME 总线通讯子任务, 用于主机板与目标处理器间的通讯; (2) 目标处理器间的协调机制, 用于目标处理器间的通讯; 其中一种是利用 pSOS+ 本身的特性解决, 即定义全局对象 (Global Object) 和共享内存, 另一种是在任务中直接使用队列、消息、信号灯等机制; (3) 设备驱动通讯子任务, 用于与外挂设备通讯。

视觉模块是以外挂方式与 GKD3 相连, 向任务或人机交互中的任务生成提供操作对象的方位信息, 或者向操作员提供电视图象, 以监督任务执行。目前视觉模块是挂在 PC 机上的 MFG 图像板, 以后

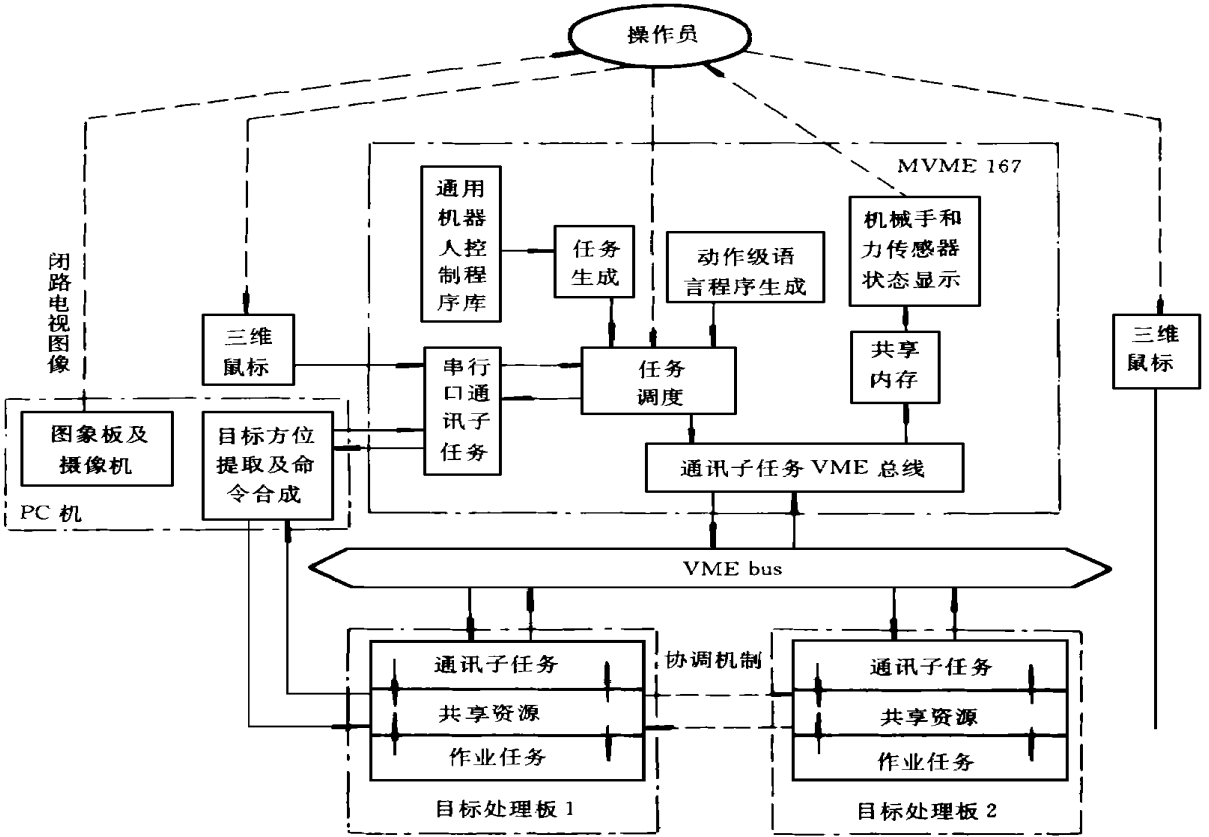


图 3 GKD3软件系统结构

打算用安装在 VME 总线上的 COGNEX 视觉系统代替。

人工干预机制的作用是由操作员直接干预任务, 停止、暂停任务的执行, 或由操作员接管对机械手的控制。对机械手的直接控制是通过三维鼠标实现的。由三维鼠标给出操作员的直接控制信息, 由控制器中的鼠标信号采集和命令合成模块下达给机器人, 同时, 也可将三维鼠标与任务直接结合。

## 2 系统分析

### 2.1 GKD3的监控模型

监控自主式机器人是一个复杂的人机系统, 计算机在其中担负了两类功能上相互独立的工作: (1) 利用传感器、驱动器和环境的相互作用, 构成闭环的具备局部自主能力的底层控制器; (2) 为操作员提供任务生成、监视和人工干预的手段和机制。因此 GKD3 把一个监控机器人系统看成是由两个功能子系统构成的: 操作员交互系统 (HIS-Human Interactive System) 和作业任务交互系统 (TIS-Task Interactive System), 如图 4 所示。HIS 主要对应于 MVME 167 上的人机交互模块, TIS 主要对应于 MVME 165 上的具体作业任务, 这两个子系统是层次结构的, 它们正好分别对应了智能机器人的“柔性”和“适应性”。

HIS 用于与操作员接口, 理解操作员输入的符号化指令, 帮助操作员进行任务分解等工作; 同时, 它必须能理解机器人传回的信息, 对信息进行分析处理、解释和显示。TIS 接收 HIS 发送的命令, 转化为可执行代码, 执行任务, 通过传感器和驱动器闭环控制回路。一般说来, HIS 的行为是基于规则 (rule-based) 层次的, 而 TIS 的行为是基于技能 (skill-based) 层次的。

因此, 从系统模型方面考虑, GKD3 完全符合了 Sheridan 给出的监督控制定义, 它是一个监控式局部自主的机器人控制器。

### 2.2 作业任务的开发执行

作为一个监控系统, GKD3 中操作员进行监控的一般步骤为: 规划、任务生成、监视、干预、学习。 5

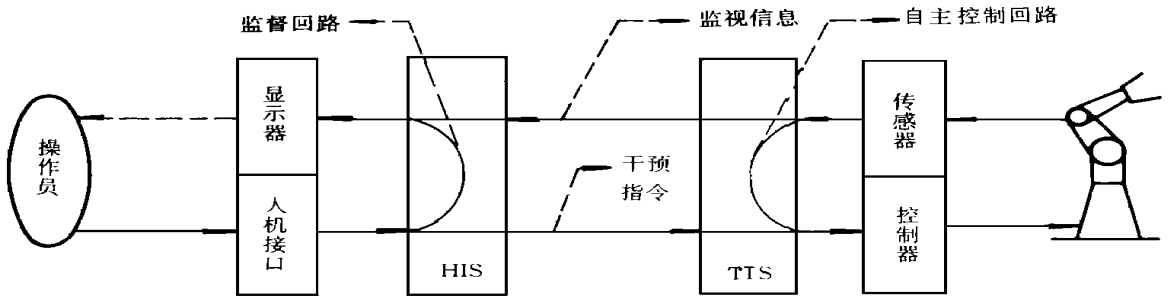


图 4 GKD3的两层概念模型

个步骤构成嵌套的三个环路,如图 5所示。每个循环对系统的改变及发生的时间间隔由内向外依次增大。

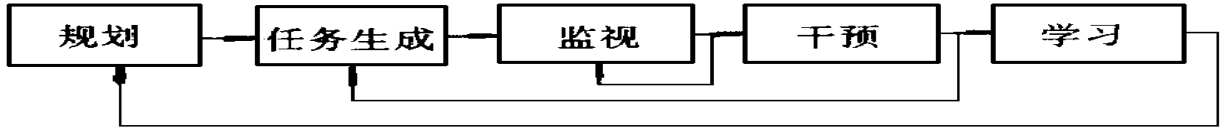


图 5 成嵌套回路的五个监控步骤

在规划步骤中, 操作员了解被控物理进程, 包括自然和工作环境所加的限制, 设置计算机能充分理解的可接受目标或折衷目标, 以作出控制决策, 提出从初始状态到目标状态的策略; 随后, 操作员决定动作序列, 将目标和策略编程为详细的计算机指令, 并下达给 TTS, 实现任务生成; 在任务执行过程中, 操作员的工作是监视, 适当分配其注意力, 监督自主编程行为的进行, 作出状态评估, 保证无异常情况; 干预指的是操作员补充正在进行的自动控制行为, 如有异常情况时, 紧急中断自动控制行为, 以指定新的目标状态和重编一个新的进程, 或者介入修正异常; 一个作业任务完成后, 操作员从整个过程学习, 以获得经验。

相应地, 我们将 GKD3 控制器开发和执行作业任务的典型流程安排如下:

- (1) 操作员利用通用机器人控制程序库和机器人语言的指令生成一个作业任务的动作序列;
- (2) 操作员将动作序列下达给机器人语言的任务调度模块, 加载到目标处理器上, 形成作业任务;
- (3) 操作员选择执行已加载的任务;
- (4) 目标处理器上的作业任务在力传感器和视觉传感器信息的支持下, 自主执行;
- (5) 操作员通过机器人状态显示界面和闭路电视图像监视任务执行情况, 一旦出现异常情况, 进行干预。操作员干预作业任务的方式有以下几种:
  - a 终止作业任务执行, 由操作员直接控制或以机器人语言指令完成作业任务;
  - b 暂停任务执行, 待满足一定条件后, 再恢复任务执行;
  - c 紧急关闭机械手, 使作业任务流产。这是一种极端情况, 一般不应使用;
  - d 终止作业任务执行, 转到步骤 1

### 2.3 共享控制和交互控制

监督控制中的两个重要概念是共享和交互式控制。它们是以人机集成时人与计算机之间不同的相互关系划分的。Ollendorf 和 Nguyen<sup>[8]</sup>在 FTS 的研究中将交互式控制定义为: 操作员先执行一部分工作, 然后让机器人自主地执行另一部分工作; 将共享控制定义为: 操作员处于遥操作状态, 机器人处于自主状态, 二者同时执行任务。Sheridan<sup>[6]</sup>列举了计算机和人的 4 种相互关系: (1) 延伸 (extend): 利用计算机, 使人能做到他单独不能完成的工作; (2) 分担 (relieve): 计算机部分地分担人的工作, 使人工作起来更容易; (3) 备份 (backup): 计算机作为操作员的后备, 防止他出现错误; (4) 代替 (replace): 计算机替代操作员进行工作。Sheridan 将 1、2 称为共享控制方式, 即人和计算机同时控制系统不同的部分; 称 3、4 为交互控制方式, 即在人和计算机之间轮流转换控制权。

交互控制和共享控制是监督控制技术在机器人系统中的具体体现方式。从前面的介绍和分析中可以看出, GKD3 能够实现共享控制方式, 而欠缺交互控制方式。这样做的原因是: 我们研究的主要目标之

一,是发挥人和计算机各自的优势,承担他们各自合适的工作,显然这要求的是共享控制方式;同时,国内外的实验研究表明,在底层系统自动化程度足够可靠和良好时,共享控制比交互控制更为有效,在 ROTEX 的空间实验研究中, Hirzinger<sup>[4][9]</sup>就认为最佳控制方式是基于本地传感器反馈的共享控制

### 3 结论

GKD 3 机器人控制器在任务执行时,操作员不介入机器人的闭环控制回路,而是通过状态显示界面和闭路电视图像观察任务的执行情况,形成监督回路,从而具备了监控式局部自主机器人控制器的基本结构和功能,成为一个具备高度适应性、良好的可操作性和集成能力的新型机器人控制器。在 GKD 3 上,我们已成功地进行了机器人力控制、双手协调及遥控等多项实验研究。

总的看来, GKD 3 有以下特点: (1)具备处理来自力传感器和视觉传感器信息的能力,实现力控制和视觉导引,使机器人具备良好的对环境的适应性; (2)建立在工业标准总线、接口和工业标准操作系统和窗口基础之上,使控制器具有良好的系统化、规范化的模块划分和数据结构、通讯机制,以便于系统扩展; (3)具有良好的可操作性,加入遥控功能,为机器人控制器配备人工干预手段和监视作业任务进行的监督手段

与国外的系统如 FTS ROTEX 相比, GKD 3 在功能上类似于 ROTEX,但也具有自己的一些独特的优点,如: (1)硬件具备一定的通用性,既可用于工业机器人,亦可用于移动机器人等其它类型的机器人; (2)软件系统则是面向任务的,针对特定的任务开发控制算法和确定控制策略,但软件系统的结构具备了一定的通用性。我们实验室正在研制的移动机器人控制器与 GKD 3 在结构上是一致的。同时, GKD 3 也还存在一些不够完善之处,比如: (1)HIS 的功能还不够完备。HIS 应能为操作员的任务生成、人工干预等工作提供辅助决策。TIS 在动态非结构化环境中的适应能力还有待改进。 (2)传感器及其提供的信息种类还不够丰富,视觉子系统的功能还有待于进一步提高。在以后的工作中,我们将致力于改进上述不足并使 GKD 3 实用化和产品化。

### 参考文献

- 1 张钹. 智能机器人的理想与现实—智能机器人主题战略讨论. 机器人, 1992, 14(4): 50~ 52
- 2 谈大龙. 关于我国智能机器人研究的几点想法. 机器人, 1992, 14(4): 47~ 49
- 3 Ferrel W, R, Sheridan T B. Supervisory control of remote manipulation. IEEE Spectrum, 1967, 4(10): 81~ 88
- 4 Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, Heindl J. Sensor-based space robotics—ROTEX and its telebotonic features. IEEE Trans On Robotics and Automation, 1993, 9(5): 649~ 663
- 5 Andary J H, Spidaliere. The development test Flight Telebotonic Servicer design description and lessons learned. IEEE Trans On Robotics and Automation, 1993, 9(5): 664~ 674
- 6 Sheridan T B. Automation and human supervisory control. MIT Press, 1992
- 7 Freund E, Rømann. System approach to robotics and automation. IEEE Inter Conf On Robotics and Automation, 1995, 3-14
- 8 Ollendorf S, Nguyen C. G SFC robotics research for space application. Computers and electrical engineering, 1991, 17(3): 121~ 132
- 9 Hirzinger G. Multisensory shared autonomy and tele-sensor programming—key issues in space robotics. Robotics and autonomous systems, 1993, 11: 141~ 162