

## GKD-1 RRC 机器人控制器与 力反馈顺应控制研究\*

邹逢兴

(自动控制系)

**摘要** GKD-1 RRC 是为开展机器人力反馈顺应控制的研究而设计的新型机器人实时控制器。本文介绍了它的主要性能、特点,并对用它在 PUMA 562 机械手上完成的几个典型的力/位置混合控制实验及其控制策略、实验结果进行了说明。实验表明,以 GKD-1 RRC 为核心的机器人力控制系统,控制周期仅为 4.88ms,力控制稳态误差平均小于 100g,位置控制精度不低于机械手原有水平,证明 GKD-1 RRC 控制器性能优越。

**关键词** 机器人控制器,多处理机系统,力反馈顺应控制,并行处理

**分类号** TP22.2,TP273.2

目前机器人市场上见到的各种工业机器人,如电焊、喷漆、搬运等作业机器人,大都是采用位置控制,它们的运动基本上是不受任何约束的自由空间运动。为了扩展机器人的应用领域,使它们能够完成精密装配、拧螺钉、地面扫雷和外星探测等形式的作业任务,机器人末端执行器就不可避免地会与外界环境发生接触,从而受到外界环境的约束,使机器人的实际自由度减少,并对机器人末端产生反作用力,为此,仅采用位置控制不行,还必须引入力反馈,以顺应外界环境。

机器人力控制方法的研究发展很快。目前常见的力控方法有三种:一是纯被动式顺应控制,它是利用机械手本身或特殊设计的被动柔顺机构来调节力的大小。这种力控方法一般用在力不是作业过程的主要控制目标,而仅仅用来指示机器人末端与环境的相对位置,协助机器人定位的应用场合。二是可适应被动式顺应控制,它是通过调节机器人控制器的放大倍数来达到调节接触力大小的目的。这种方法一般适用于机器人的腕部、多指手爪和直接驱动的机器人的力控制。三是主动式顺应控制,即力反馈顺应控制,它是在机器人位置控制的基础上,引入力传感器,构成力反馈控制回路,实现力/位置混合控制。这种力控方法可满足接触力是作业的主要要求,是控制的主要目标的应用需要。

主动式顺应控制是机器人力控制研究和发展的主流,正广泛应用于机器人的各种力控制作业研究中。实现机器人主动式力顺应控制的关键是提高力控制系统的响应速度,为此,必须主要从两方面努力:一方面要寻求简单高效的控制方法和算法;另一方面要研

\* 本研究得到国家 863 计划的资助,并获部委级科技进步二等奖  
1992年5月20日收稿

究、建立并行处理能力强的机器人实时控制器。本文作者及其同事正是对这两个方面进行了比较深入的研究,并以 PUMA562 机械手为控制对象,构成了力反馈顺应控制系统,完成了多种典型的力/位置混合控制实验,取得了较满意的控制效果。

### 1 GKD-1 RRC 控制器及其主要特点、性能

作为开展机器人力反馈顺应控制技术研究的环节和基础,我们自行设计和研制了一个能满足主动力控制需要的两级总线式多微机并行处理系统作实时控制器<sup>[4]</sup>。该控制器主要由四个 MC 68020 主处理器模块 (VMPU-32)、一个 MC 68000 I/O 处理器模块 (VIOP) 和一个共享存储器模块 (CM) 等部分构成。其硬件系统结构如图 1 所示。其中 VME System 9000 为控制器的上位机和前端机。

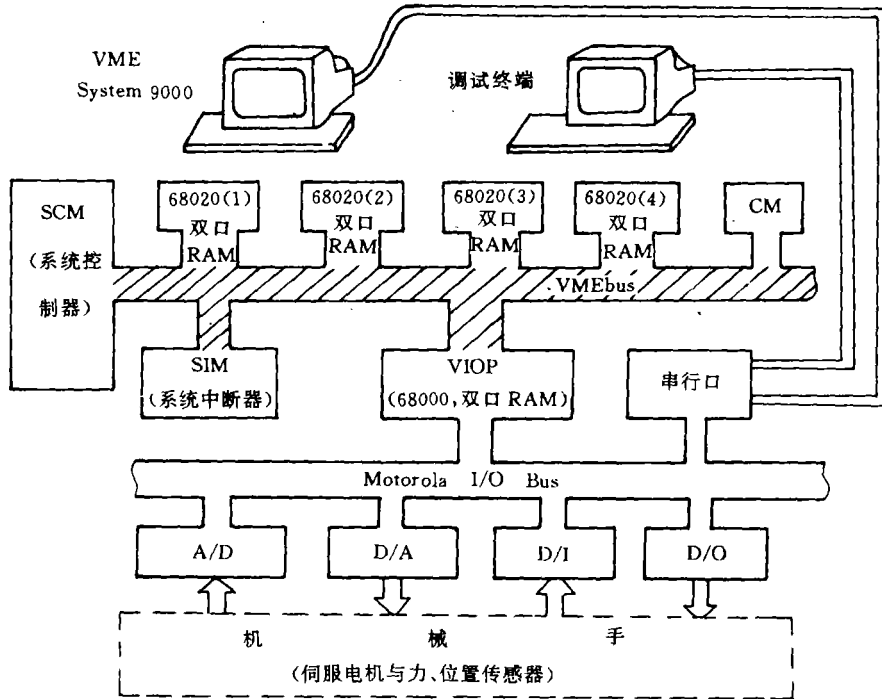


图 1 GKD-1 RRC 硬件系统结构

以上述硬件环境为基础,我们设计、开发的系统软件和功能软件有:

- (1) 多机系统的引导、测试、诊断程序;
- (2) 多机并发操作系统内核<sup>[4]</sup>;
- (3) 多机系统调试环境和人机交互的支持程序;
- (4) 上位机与多处理机间的通讯程序;
- (5) 实时 I/O 驱动程序;
- (6) 异常处理程序;
- (7) 机器人控制模型的并行计算函数库。

由于 GKD-1 RRC 控制器主要是为在 PUMA 562 机械手上做力反馈顺应控制实验而设计的,因此必须在 GKD-1 RRC 和 PUMA 562 之间建立起实时 I/O 通道,以使用 GKD-1 RRC 代替 PUMA 562 系统原有的控制器及其接口。为此,我们以原系统控制器中的 J-BUS 总线分界面,去掉由安插在 Q-BUS 总线上的 LSI-11/73 CPU 板、CMOS 存储板、A 接口板、B 接口板等组成的系统主控级部分,以 GKD-1 RRC 多处理机系统

取而代之,完整保留由安插在J-BUS总线上的6套数字伺服板、功放板等组成的关节伺服级。经过这样按这种界面划分,需要设计的I/O通道应包括:12路模拟输入通道(A/D通道),6路模拟输出通道(D/A通道),6路数字输入通道(D/D输入通道),4路数字输出通道(D/D输出通道)。

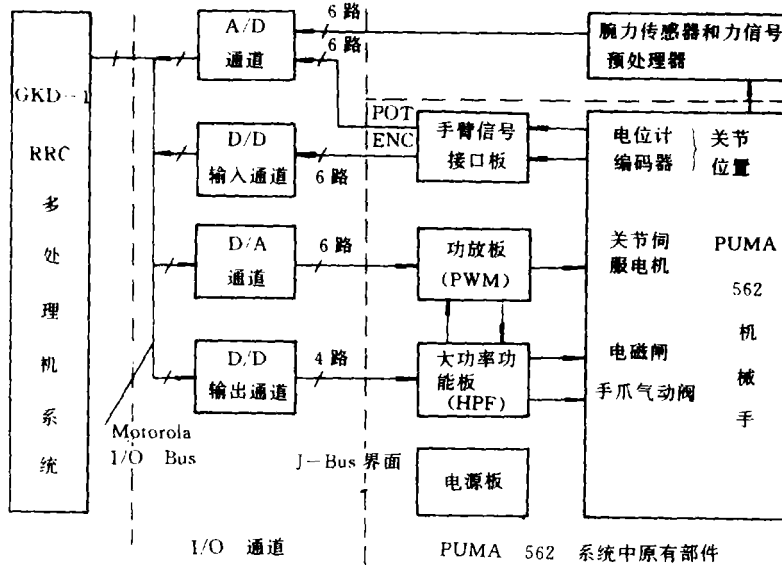


图2 界面划分示意图

为了使设计的机器人实时控制器不仅能满足PUMA 562手力控制的需要,而且具有良好的可扩展性、通用性,我们实际设计的I/O通道比上述有所扩充。

GKD-1 RRC的主要特点和性能如下:

(1) 采用的是功能集中,用同一操作系统(内核)统一管理,动态划分和分配负载,实现负载动态平衡的多微机并行处理结构。其突出优点是重构性好,容错能力强(兼具有并行处理和冗余容错的功能),用户编程方便。

(2) 实现两级并行处理:一级是I/O操作和问题求解的并行处理,另一级是问题求解过程中的多微机并行处理。加上设计了实时I/O驱动和预处理软件,使力/位反馈控制周期大大缩短。

(3) 多微机控制器及其I/O通道均采用全开放式模块化总线结构,扩充性好,适应性强,可方便地适应各种机器人(甚至其它控制对象)和控制任务的需要。

(4) 浮点乘法时间  $3\mu\text{s}$ 。

(5) 力/位反馈控制周期  $4.88\text{ms}$ 。

(6) 共享存储器容量  $8.5\text{MB}$ 。

(7) 提供的I/O通道数: A/D通道16路(各12位); D/A通道8路(各12位); 并行数字输入通道6路(各16位); 并行开关量输出通道4路(各4位); RS-232C串行I/O口8个。

## 2 力/位置混合控制策略与并行算法

围绕机器人力/位置混合控制策略和算法,我们进行了较长时间的理论研究、仿真研究和实验研究。最后在主动力顺应控制实验中实际采用的控制策略和并行算法的基本思想是:

(1) 由于力/位混合控制的机械手具有按需要与环境相互作用的功能,所以我们在建立力/位混合控制的数学模型时,将力(矩)/位(姿)采用两个互补的正交子空间描述,先建立一个约束空间坐标系  $x_f y_f z_f$ , 然后通过合适的选择矩阵,选取  $x_f y_f$  作为位置自由子空间(或叫力约束子空间),选取  $z_f$  作为力自由子空间(或叫位置约束子空间)。这样,使控制模型得到简化。

(2) 在设计控制实验时,根据我们使用的是四分量  $(F_x F_y F_z M_x)$  腕力传感器的实际情况,我们采用了关节空间和操作空间的混合控制方法,即位置  $P_x P_y P_z$  和力  $F_x F_y F_z$  以操作空间控制法为基础,采用操作空间坐标系描述和控制;而力矩  $M_x$  和姿态则以关节空间法控制为基础,具体实现的策略是:力矩  $M_x$  的控制采用优先关节(对  $M_x$  影响最大的关节)控制方案。在雅可比矩阵中对  $M_x$  影响最大的是  $J_{00}$  (且恒等于1),因而只用  $\theta_0$  即可基本实现对  $M_x$  的控制。姿态控制采用第4~6关节的关节控制方案,并对  $\theta_1 \sim \theta_3$  对姿态的影响施加某些校正。

综合上述(1)、(2),力/位混合控制的原理如图3所示。其中:

$X_d, \dot{X}_d$  和  $F_d$  为规划的操作空间的位置、速度和力的轨迹值;  $K_p, K_{v_p}$  和  $K_f, K_{v_f}$  分别为位置控制算法和力控制算法;  $R_f, R_p$  用于力/位选择,由规划器给出;  $\Omega$  和  $\bar{D}$  为力矩和姿态在操作空间的选择矩阵,完成机械手的作业环境(运动限制几何)的计算;  $H$  为机械手惯量矩阵;  $J$  为雅可比矩阵;  $F_p$  为操作空间位置偏差产生的控制力,  $F_f$  为力偏差产生的控制力,  $F_c$  为补偿力;  $\tau$  为机械手的关节驱动力矩;  $T_1, T_2$  为两个齐次变换阵,分别完成机械手的运动学计算和力变换。

(3) 对于各力矩项,我们忽略了哥氏力矩和离心惯性力矩,并将惯量矩阵取为对角阵,只对重力力矩进行了补偿。这样做,在机械手运动速度不高的情况下,可起到简化模型,减少计算量的作用。

(4) 考虑到机器人控制的运算主要是运动学和动力

学的一些矩阵/向量运算,这些矩阵/向量的计算量大约要占整个控制计算量的80~95%,因此我们在设计上述控制模型的并行算法时,采用分块并行算法,即按齐次变换矩阵、雅可比矩阵、重力补偿向量等矩阵/向量运算及它们之间的运动作为独立的并行计算块,编成独立的并行计算函数,将它们组成并行计算函数库。设计控制工作程序时,

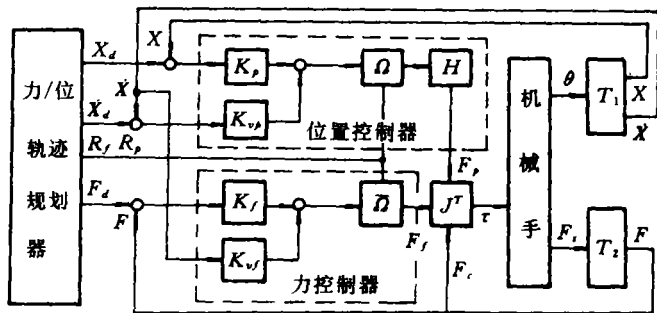


图3 力/位混合控制原理框图

只需按计算顺序和同步原则,调用函数库中各有关并行计算模块,生成计算序列即可。实践表明,按这种方法对六关节 PUMA 手力/位混合控制模型进行并行任务划分和调度,用 3 个 CPU 运算时,其并行计算效率在 93% 以上,计算时间不到 4ms。用 4 个 CPU 运算时,时间则只有 3ms 左右。

### 3 力控制实验

按照上述控制策略和并行算法,我们以 PUMA 562 机械手为对象,从反映力控制系统不同控制功能和性能的角度出发,设计并完成了几种典型的力/位置混合控制实验,它们是:

(1) 零力控制实验。它包括操作空间绝对坐标系的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的零力控制和工具坐标系的  $Z_i$  方向的零力矩控制。(这两个坐标系的定义如图 4 所示意。)当操作空间中有一个力矢量加在手爪上时,力控制系统通过传感器测出该力矢量在工具坐标系中的映象的分量  $F_{x_i}$ 、 $F_{y_i}$ 、 $F_{z_i}$ ,并经控制器解算得出力矢量在操作空间中的方向,然后控制机械手作此矢量方向上的移动,以使手爪上的受力为零。当工具坐标系的  $Z_i$  轴上有力矩作用时,系统通过在关节上施加转矩,使  $Z_i$  轴上的力矩为零。

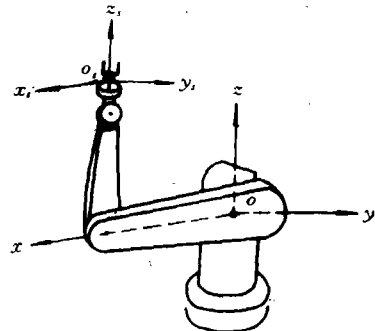


图 4 操作空间坐标系和工具坐标系示意图

(2) 平面定压实验。它以台秤为测力仪器和加压对象,控制机械手手爪沿操作空间的  $Z$  轴负方向向下以一恒力平稳地施加于绝对坐标系  $xoy$  平面(秤盘)上。该实验主要是定量反映力控制的精度。

(3) 冲击定压实验。它与平面定压的实验原理基本相似,差别只在于手爪向下冲击的对象不是台秤秤盘,而是各种不同刚性的物体(如木板、铝板、钢板等)。该实验主要用以反映力控制系统对环境刚度的适应性和系统的阻尼特性,检验系统在不同作用环境下的稳定性。

(4) 擦玻璃(即平面跟踪)实验。这是一个比较典型的、接近实用价值的力/位置混合控制实验,它在操作空间绝对坐标系的  $x$ 、 $y$  方向上进行位置控制, $z$  方向上作恒力控制,达到沿规划的运动轨迹,以一定的接触力,在玻璃平面上循环擦拭的目的。

(5) 曲面跟踪实验。原理与平面跟踪实验相同,即在操作空间的  $x$ 、 $y$  方向为位置控制, $z$  方向为力控制,利用  $z$  方向的位置约束实现曲面跟踪。它主要用以反映力/位置混合控制的效果。

(6) 插销钉入孔实验。控制机械手手爪抓取一根下端为锥状的圆棒,先在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向加位置控制使圆棒到达一具有锥形导口的、直径略大的圆孔上方,然后保持  $x$ 、 $y$  坐标,用  $z$  方向的控制使手爪垂直向下运动,当圆棒触及孔的锥形导口时,由  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的位置控制切换为  $x$ 、 $y$  方向的零力控制和  $z$  方向的恒力控制,使圆棒准确插入孔内。该实验通过插销钉入孔的动作,反映了采用力/位置混合控制方法实现简单精密装配

的能力和优越性。

上述实验的结果表明,以 GKD-1 RRC 多微机控制器为核心的机器人力控制系统,其测力范围为 0~23Kg;力控制稳态误差平均小于 100g;位置控制的重复精度基本上不低于机械手原有水平。主要功能和性能与美国斯坦福大学 80 年代中后期在 NYMPH 系统上完成的力控制实验水平相当。

本文介绍的 GKD-1 RRC 机器人控制器,就其性能和所完成的力/位置混合控制实验种类与效果看,与国际上 80 年代中后期同类研究成果(如美国斯坦福大学的 NYMPH 系统)的水平基本相当,达到了预期目标和效果。该控制器的结构新颖灵活,实时性和适应性很强,重构性、容错性好,用户编程方便,不仅可作为各种基于力传感信息的工业机器人、空间机器人和军用机器人的通用新型控制器,还可用于各种工业过程的实时控制。

### 参 考 文 献

- 1 Bradley J Chen, Fearing Ronald S, Armstrong Brian S and Burdick Joel W. NYMPH: A Multiprocessor for Manipulation on Applications. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April, 1986
- 2 Sundar Narasimhan, David M Siegel, John M. Hollerbach. Condor: An Architecture for Controlling the Utah-MIT Dexterous Hand. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1989, 5(5)
- 3 邹逢兴. 一种用于机器人力反馈依从控制的计算机体系结构. 国防科技大学学报. 1990, 12(4)
- 4 肖人庆. 机器人力反馈依从控制器多机系统分布式程序设计的实现. 国防科技大学学报. 1990, 12(4)

## GKD-1 RRC Robot Controller and the Research of Force-feedback Compliance Control

Zou Fengxing

(Department of Automatic Control)

### Abstract

GKD-1 RRC controller is a new type of real-time robot controller designed for the research of the robot force-feedback compliance control. This paper firstly introduces the main performances and features of GKD-1 RRC controller, and then describes several force/position mixed control experiments and its control strategies and results. These experiments are fulfilled on PUMA562 manipulator with GKD-1 RRC. In these experiments, the control period is shorten to 4.88ms; average force control static error is smaller than 100g; position control accuracy is not lower than that of PUMA562. These results prove that GKD-1 RRC controller has high performances.

**Key words** multiprocessor, parallel processing, robot controller, force-feedback compliance control