

关于机器人力控制器 计算机系统的设计方案探讨

邹逢兴

(自动控制系)

摘要 本文从机器人力反馈依从控制的任务和要求出发,对机器人控制多处理机系统设计中的几个主要问题,包括总的系统结构、存储器结构、机间互连结构、中断系统结构,并发实时操作系统、处理机选型和多处理机系统的调试等,进行了探讨。

关键词 机器人,多处理机系统,力控制器

分类号 TP242

目前,力反馈依从控制技术和力控制器的研究正成为国外机器人技术研究的热点之一,也受到国内机器人工程界的高度重视,原因在于它是研究和开发智能机器人的关键性基础技术之一。而实现力控制器的核心又是要研制一个高速度、大容量的机器人控制

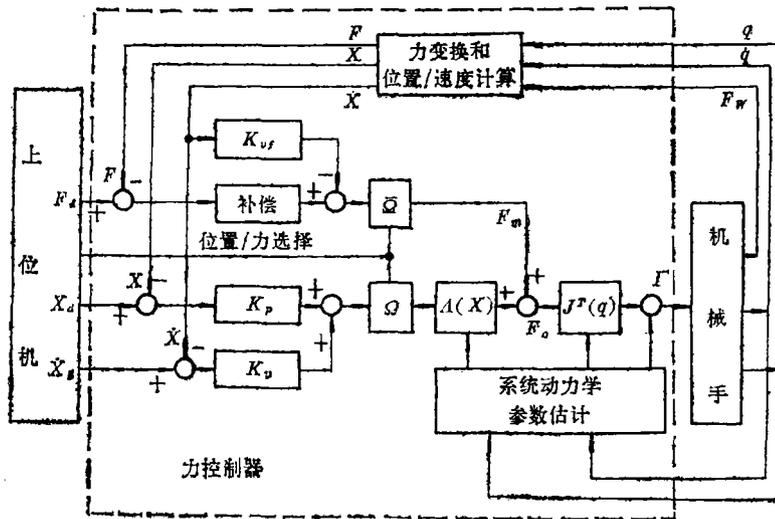


图1 力控制器结构

计算机系统,所以机器人控制计算机系统的设计就成为研制力反馈依从控制器的最主要内容。

机器人力反馈依从控制是以操作空间法为基础的力控制或力/位置混合控制,其结构如图1所示。

图中虚线框内即为通常所谓的力控制器,它的任务是通过伺服控制使机械手跟随上位机(规划级)送来的操作空间位置(X_d)、速度(\dot{X}_d)和力(F_d)而动。通常它在内部计算处理上分为高层和低层两级。高层为参数估计级,主要计算有关运动学和动力学模型的组态;低层为伺服控制级,它用力/位置传感器数据和来自高层的动力学数据,求解伺服方程。这种力控制器与通常工业机器人那种以关节级PID算法为基础的位置控制大不相同,它是以操作空间的直接解耦控制为基础的。但是,它的力控制又是通过对关节的控制来实现的,这就使力的反馈回路中必然要包括比较复杂的关节空间与操作空间之间的相互转换。此外,还要对包括力在内的多种传感参数进行实时采集、处理和控制在,其中包括直线或圆弧的插补计算,以及确定对象物的方位、手和物体的接触位置与接触力等实际信息,并根据这些信息及时调整手的运动。可见,实现以操作空间法为基础的力控制或力/位置混合控制,比实现以关节一级的PID算法为基础的位置控制要复杂得多,计算量要大得多,而两者在运算周期上又要大体相同,才能满足实时控制的要求,比如以六关节PUMA手为控制对象时,从力/位置传感参数的输入到控制指令的输出,时间一般应小于5ms。所以,为了保证控制的实时性、准确性和稳定性,就需要对机器人力反馈依从控制计算机的计算速度和存贮容量等性能提出更高的要求。本文正是从这种需要出发,在综述国外用于机器人控制的计算机系统的设计原则和结构方案的基础上,对机器人力反馈依从控制计算机系统设计的几个主要问题进行了探讨。

1 总的计算机系统结构

实践证明,采用传统的单处理器系统来实现机器人力反馈依从控制器是肯定不行的。即使采用16位,以至32位的超级小型机(如PDP11/45和VAX11/780)也无法满足它的计算需要。美国斯坦福大学AI实验室曾先后用PDP11/45单机结构和PDP11/45与PDP11/60双机结构做过机械手力/位置混合控制的实验,均没有成功,而后来改用多个NS32016组成并行处理结构作实验,则获得了圆满成功。所以,目前国内外几乎毫无例外都是采用多机并行处理结构来实现机器人控制中多任务和计算的并行处理与控制,以提高机器人控制系统的工作效率和速度。

多机并行处理系统用于机器人控制方面,目前主要有三种结构型式:流水线式结构,并行处理机结构和多处理机结构。它们各有特点,但相比之下,多处理机结构用得更为广泛。多处理机结构是一种MIMD的计算机结构,它实现的是任务和指令级并行处理,即多CPU可并行地执行不同的指令,完成不同的任务。它不仅适于向量数组处理,也适于多种计算问题的并行处理,所以相对于另两种结构,机器人控制中应用得更多些。如日本京都大学和日立公司合作研制的机器人控制系统,美国斯坦福大学AI实验室为机器人手和手臂控制研制的通用控制器NYMPH系统,Clemson大学和俄亥俄州立大学为机械手和腿行走机构等多关节系统的动态控制设计的多处理器系统,MIT AI实验室

为Utah/MITdexterous手的控制设计的多处理器控制系统等等,采用的都是多处理机结构。所以综合起来看,实现力反馈依从控制器,还是以采用多处理机结构更合适。

确定并行处理的系统结构后,如何选定并行处理单元(即参与并行处理的处理机)的个数呢?这主要应根据机器人控制方法和算法对并行性的实际要求,以及系统的效率和成本这两方面的折衷来考虑。根据国外对机器人控制算法的研究,一般认为4~7个比较适中,既可满足机器人控制中大部分数学计算的并行处理要求,充分体现出并行处理的优越性,又不致于使系统过于复杂,成本过高。我们自己对多关节机器人系统的力/位置混合控制的运动学、逆运动学,雅可比矩阵和逆矩阵,以及机器人动力学数学模型,也结合实验从理论上进行了并行性分析。分析结果同样表明,从提高加速比和并行效率两方面综合性能看,以采用4~6个CPU实现并行处理为佳^[7]。正因为这样,近几年国外实现的各种机器人控制器,大都是采用4~7个不等的微处理机构成多机并行处理系统。

当然,作为一个比较通用的机器人控制计算机系统,除了多机并行处理部分外,一般还要设置一个主机(host),用于整个系统的控制和管理,负责冷热启动,提供人机交互能力,提供程序开发环境和文件I/O服务。

2 存贮器结构

多处理机系统中,存贮结构主要分为两大类:分布式存贮结构和共享存贮结构。实际中,还存在介于上述两者之间的一种存贮结构,即既有共享存储器又有本地存储器的所谓邮箱共享存储结构。它对应的是一种中等程度的紧耦合系统,工作时基本遵循就地处理原则,局部存贮器LM存贮工作程序、专用数据和专用变量,而CM只存贮公共变量和进行数据交换,起邮箱的作用,这样可尽量减少各处理单元间的信息来往,提高整个系统的处理速度。目前机器人控制多处理机系统中,虽然上述三种存储结构均有实例可寻,但大都采用这第三种存贮结构。

另外,国外已实现的一些有代表性的多处理机系统的经验表明,当有4个以上的MPU时,就会由于存贮器带宽不够而导致比较明显的存贮访问冲突,使得瓶颈问题比较严重。为此,可考虑从以下方面来改善存贮器的性能:

(1) CM采用多体结构,即采用多体共享存贮器。

(2) 各本地存贮器LM运用高速缓存器(cache)加以完善。国外研究成果表明,对于同一种MPU芯片,带cache比不带cache,速度可提高一倍左右,所以许多公司为满足实际需要,在芯片上就放入cache,比如Motorola公司的MC68010(16位)和MC68020(32位),都有带cache和不带cache两种产品,我们可根据需要选用。

(3) 保证作为CM的RAM芯片,存取速度比LM高得多。要求CM的理想的速度是比LM的速度快P倍(P=处理单元个数)。

3 机间互连机构

多处理机系统从硬件角度看,在大的系统结构选定以后,关键是机间互连机构的设计和实现。设计互连机构的根本目的是:以尽量短的路径实现任意两个处理单元之间的连接,使得相互间的联络和通讯尽可能地快。

一般说来要提高整个系统的快速性、实时性,瓶颈主要在互连机构,所以互连机构的好坏对整个系统的性能关系极大。

具有共享存贮器的紧耦合系统的互连结构通常有4种:总线结构、cross bar switching(纵横开关)结构、多端口存贮器结构、开关枢纽结构。它们本质上没什么区别,只是各自把机间互连必须的开关单元和仲裁逻辑放在不同的地方罢了。

目前在各种机器人控制多机并行处理系统中,使用最多的是总线结构,因为它在各种互连结构中最简单,成本最低,模块化和扩展性也最好。其缺点是易于产生总线冲突,从而使系统效率低,但考虑到机器人控制多处理机系统中的处理机个数不算多(一般不超过8个),只要选用具有足够频带宽度的总线,采用总线结构是可以满足要求的。按照机器人力反馈依从控制中应该具有的关节伺服速率和空间力伺服速率的要求,对单总线结构下总线带宽的保守估计,不过几百K字节/秒,而一般现在常用的标准总线Multibus(16位), Multibus II(32位), VMEbus(32位), MVMX32bus(32位), VERSAbus(32位)等的带宽,都远远超过上述总线带宽要求的10倍以上,所以一般说来,总线冲突不会成为大的矛盾。当然,为了有效分解总线冲突,必须按固定优先权算法或循环算法等设计总线仲裁逻辑,并从硬件或软件上采取措施避免死锁。

4 中断系统结构

为了保证机器人控制计算机系统的正常运转,协调系统内部各部分之间的工作及其与机械手和操作人员的关系,需要设置一个中断系统。

中断系统结构主要可从三方面去考虑:

(1) 采用集中式中断处理系统还是分布式系统。前者,系统中只有一个接收所有中断请求并为其服务的中断处理器,后者则有两个以上中断处理器。

(2) 确定中断系统的软硬件界面划分原则,比如中断响应用排队器硬件实现,而中断处理则用软件技术实现。因为通常中断源数目总是远远多于系统所能提供的中断级数,所以按照上述原则,可先对中断源分类,把性质相近的中断源划为同一类,将它们“线或”在一起形成某级中断请求信号;然后,直接利用中断控制器电路(硬件)来响应各类中断请求,并自动形成中断向量,再在相应中断处理程序中(软件)查询该类中的具体中断请求源,并为其服务。请求源被查询的先后决定了其在一类中的优先级高低。当然,同一类中不同中断源的优先级高低,也可通过菊花链路而不是靠软件查询顺序来确定。

(3) 中断处理算法的选择。中断判决和总线判决相似,通常也有固定优先级和循环优先级两种算法,在机器人控制计算机系统的具体情况下,一般采用固定优先级算法,根据实际需要确定各类中断源的优先级高低。

5 多处理机实时操作系统

多机并行处理系统的设计,在大的系统结构确定以后最关键的工作是要设计一个高效实时的多机并发操作系统。一般说来,要把一个多机操作系统设计得很完备是十分困难的。作为一个实时控制专用计算机,不可能、也没必要象通用机那样去追求操作系统

的完备性，只需使之具有并发操作系统的一些基本功能即可。

一般说来，操作系统执行的功能是初始化外部操作，响应外部文件，协调内部操作程序并分配资源。具体说，应该具有下列基本功能：

- (1) 实现文件管理和任务管理，将用户任务从辅存送入程序执行环境，并按照任务分配的结果将任务加载到相应的并行处理单元，启动任务的执行；
- (2) 实现处理机和存贮器的管理；
- (3) 实现并发进程的派生、同步和通讯、调度；
- (4) 实现并发进程对共享数据的互斥访问；
- (5) 完成中断处理；
- (6) 提供必要的故障探测与容错功能。

这些功能根据整个系统的结构考虑，可以采用集中式或分布式来执行。不管是集中式还是分布式，控制功能都必须保证：由系统中不同处理机执行的进程不以有害的方式相互连接。否则在系统的启动或操作期间，一个程序可能破坏另一个程序。

为了支持系统的上述功能，操作系统（内核）一定要设计足够的原语及有关的数据结构。另外，机器人控制的实时性约束，要求操作系统应高速执行。因此在设计时，除了合理的过程编码（一般用汇编语言实现，目前也有用C语言，或C语言与汇编语言的结合来实现的）外，最重要的是，按照响应时间的要求设计访问机构（如信号灯）和数据结构。为了提高操作系统的运行效率和对用户的透明性，设计时最好采用分层结构和模块化结构。

由于操作系统的内核是直接和系统的处理机相接口的，所以在实现内核功能时不可避免地要涉及到硬件的拓扑结构。换句话说，内核在逻辑上受到并行要求的约束，而在实现结构上受到硬件的限制，因此，操作系统的设计要兼顾这两个方面，要和硬件的设计紧密结合。

6 关于处理机选型

处理机选型，主要是以多处理机系统在结构和控制信息两方面对MPU芯片的特殊要求及实现机器人控制对MPU的性能需要为依据。前者一般不成什么问题，因为目前市场上能买到的几乎各种微处理器芯片，都能基本满足组建多处理机系统的要求，特别是近几年推出的各种16位和32位MPU芯片，在结构和控制信息方面均特别考虑了构成多机系统的需要。

从机器人力反馈依从控制或通用控制的角度出发，为了满足控制速度和精度的要求，最好采用32位MPU。前几年受当时器件所限，一般用16位MPU。自1984~1985年开始推出商用32位芯片以来，国外已普遍倾向于用32位MPU组建机器人控制器，许多单位和专家都对用32位和用16位多MPU系统来实现机器人控制的性能，从算法研究和实验研究两个角度进行了分析比较。如俄亥俄州立大学，普渡大学，中国台湾工学院和台湾交通大学等，都对用16位机和32位机来实现笛卡尔空间的手控制定律，实现全逆向运动学和全逆向动力学的计算，进行了比较。比较结果表明，用32位多处理机更能保证具有全逆向运动学和动力学计算的手控制定律的实现。

几年来,国际上先后推出了多种32位MPU芯片^[4],其中每种均可选用。但根据美国Sperry公司对其中四种推出较早、影响较大的32位MPU的基准性能(Benchmark)进行测试比较,认为MC68020最优,它在处理器内部的流水线结构、存储器管理、浮点运算和处理速度等主要性能方面,都可与VAX11/780相当,甚至有所超过。另外,据国外有关电子学的杂志评论,认为生产芯片最著名的Motorola和Intel两家公司的MPU芯片,设计时对其应用范围各有侧重,Intel的芯片更适于做通用计算机,而Motorola的芯片则更适于做实时控制器。加上MC68020和Intel80386在LSI外围电路的配套方面不相上下,所以目前采用MC68020(近年来又推出了MC68030,MC68040)为并行处理单元的MPU看来是比较合适的。近年来,用英国Inmos公司生产的32位Transputer单片机作并行处理单元的呼声也日益增高。

另外,考虑到机器人控制的计算中,为了保持机械手位置、方位和力度的精确性而主要采用的是浮点数据,为此,各个并行处理单元中的MPU最好都带浮点协处理器(FPCP)。国外实验研究表明,有没有FPCP大不一样,做浮点加法和乘法运算时,带FPCP比不带FPCP可加速200~300倍,例如NS32016加浮点协处理器NS32081,做浮点乘法只要5~6 μ s;如不加NS32081,则需1300~1700 μ s。因此,斯坦福大学AI实验室的NYMPH系统中每个32016都带了一个32081(MC68020的浮点协处理器是MC68881)。

7 多机系统的调试

系统调试是系统设计的重要组成部分。与单机系统相比,多机并发系统设计的复杂性必然导致调试的复杂性和困难程度。在多机并发系统中,控制信号量多,信号间的相互关系复杂,系统中往往存在着一些难以捉摸的时间相关故障。这些故障,使用常规的测试手段很难判断究竟是软件还是硬件问题,要故障定位就更难了。所以,通常应用微机开发系统、逻辑分析仪和在线仿真器等较先进的设备,再配以一些调试程序和诊断包来进行硬件、软件的调试和诊断。正是这些比较昂贵的调试工具,将造成开发研制费用的激增。

多处理机并发系统的调试主要是硬件、低级I/O、内核和并发高级语言(CHLL)级四部分调试,一般采用“自底(硬件)向上(CHLL级)”的方法逐层进行。其中前三部分采用上述调试设备加测试软件的技术可以完成。唯有CHLL级调试,尚需要进行全面特殊的处理,比较起来难度更大。

8 结 语

本文从机器人力反馈依从控制的任务和要求出发,纵观了国外许多机器人控制计算机系统的设计思想和结构方案,形成了上述观点。这些观点对研究工作是很意义的。

参 考 文 献

- [1] Oussama Khatib and Joel Burdick. Motion and Force Control of Robot Manipulators. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April, 1986
- [2] Zheng Yuan F and Chen Ben R. A Multiprocessor for Dynamic Control of Mu-

- Italink System. IEEE International Conference on Robotics and Automation, March, 1985
- [3] Bradley J Chen, Fearing Ronald S, Armstrong Brian S and Burdick Joel W. NYMPH: A Multiprocessor for Manipulation Applications. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April, 1986
- [4] 邹逢兴. 32位微处理器与微计算机世界的发展动向与应用前景. 1987年湖南省宇航学会论文集
- [5] 区益善. 多微机系统与并行处理. 广州: 华南工学院出版社, 1987
- [6] Kai Hwang, Faye A. Briggs. Computer Architecture and parallel Processing. MCGraw-Hill Book Company
- [7] 蔡荣希. 递推N-E法的并行性研究. 国防科技大学自动控制系统研究生论文, 1988

Investigation of Design Projects on Computer System of Robot Force Controller

Zou Fengxing

(Department of Automatic Control)

Abstract

Starting from the task and the demand of robot force-feedback compliance control, the author investigates several main problems in the design of computer system for robot control, including general system architecture, memory structure, interconnection network structure, interrupt system structure, concurrent and real-time operating system, processors selection, multiprocessor system debugging and so on. Some design principles and structure projects selectable are presented in the paper.

Key words: robot, multiprocessor system, force controller