

文章编号: 1002-0446(2000)03-0235-06

# 机器人控制器体系结构研究的现状和发展

李开生<sup>1</sup> 张慧慧<sup>1</sup> 费仁元<sup>1</sup> 宗光华<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学机电学院 100022; 2. 北京航空航天大学机器人技术研究所 100083)

摘要: 本文首先给出了机器人控制器的定义和分类, 介绍了机器人控制器体系结构方面的研究情况, 提出了有关机器人体系结构研究发展的几个方向.

关键词: 机器人; 体系结构; 控制器

中图分类号: TP24

文献标识码: B

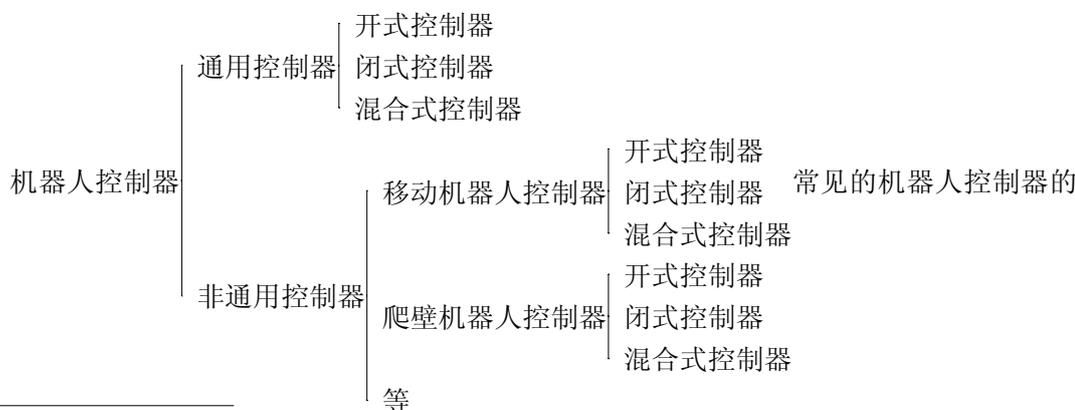
## 1 引言

机器人控制器体系结构主要是指控制机器人的软件和硬件结构, 通常也简称为机器人体系结构. 研究机器人体系结构的目的是为简化机器人系统的设计和开发, 特别是随着机器人控制和功能日益复杂化, 而越来越受到重视. 目前, 有关机器人体系结构的研究主要集中在两类系统上. 一是基于性能的或反应式的系统, 其特点是紧耦合、最小化计算和实现任务的性能分解; 另一是异步、同步控制 and 数据流混合系统, 异步处理的特征是松耦合和基于事件的驱动, 而同步处理的特征是紧耦合、使用公共时钟和严格的实时性要求.

## 2 机器人控制器的定义

明确机器人控制器的定义, 可以清楚的界定机器人控制器所涉及的范围, 研究的对象以及最终的目标. 机器人控制器的设计通常分为两个阶段: 功能设计和结构设计<sup>[1]</sup>. 功能设计阶段主要完成控制功能和算法的定义, 而结构设计阶段是实现功能在硬件和软件上的分布. 这一思想随着机器人控制器的发展, 而越来越受到重视. 同时, 也为机器人控制器体系结构的研究确立了一个总体框架. 因此, 机器人控制器可以定义为: 完成机器人控制功能的结构实现.

## 3 机器人控制器的分类



分类方法主要是根据 1)、按照机器人的类型; 2)、按照控制算法的处理方式; 3)、按照控制器结构的形式; 4)、按照基本功能单元的类型等来划分. 考虑到对机器人体系结构的研究, 通常是按照不同类机器人来进行的, 综合考虑机器人的分类和控制器的定义, 采用如下的分类:

#### 4 机器人控制器的发展概况

机器人控制器的研究已经由硬件过渡到软件、由具体控制器过渡到通用开放式体系结构、由单独控制过渡到多机协调控制. 国外有专门的研究机构和公司对机器人控制器进行研究和制造. 同时, 也得到国家相关部门和企业的资助. 因此, 国外的机器人控制器发展很快, 智能水平很高, 并且正在进行许多开创性的研究. 归纳起来主要在两个方面: (1) 机器人控制器的功能结构, 主要是智能控制、多算法融合和性能分析、控制器体系结构; (2) 控制器的实现结构, 主要是实时多任务操作系统、开放结构标准、多控制器结构和网络化、运动控制器. 当然, 两者之间在一定范围内是重合进行的.

##### 4.1 运动控制器方面

运动控制器是控制器的底层结构, 有时也可作为一个简单的控制器. 其产品和研究主要集中在美国和日本, 并有成熟的产品, 如美国 DELTA TAU 公司、日本朋立株式会社等. 其运动控制器以 DSP 技术为核心, 基于 PC 的开放式结构. 另外, 美国的 Trellis 公司开发了一种 NOMAD 运动控制软件包<sup>[10]</sup>. 它基于 LynxOSTM 操作系统, 与普通计算机相一起就可完成基于传感器的运动控制器的全部功能, 同时用户能够方便地修改和更换运动控制规律. 美国 CIMETRIX 公司研制了一种用途更广泛的底层控制器——ROBLINE 开放式结构的控制器<sup>[3]</sup>, 它能够在一种基于标准的操作环境和硬件平台下控制不同类型的机器. 该控制器也使用 Lynx 操作系统. 除了主处理器外, 每一台控制器至少包含一个数字信号处理器(DSP)用于底层伺服控制和 I/O 监督. 系统采用客户/服务器结构, ROBLINE 控制器作为服务器, 而其他控制系统、通用工具、或应用程序作为客户.

##### 4.2 控制器体系结构方面

控制器体系结构方面的研究已成为热点, 其重点是功能划分和功能之间信息交换的规范方面.

在日本, 体系结构以硬件为基础来划分. 如三菱重工株式会社将其生产的 PA-10 可携带式通用智能臂式机器人的结构划分为五层结构: 第一层为 7 关节操作器; 第二层是伺服驱动; 第三层是运动控制器; 第四层是操作控制, 包括操作箱; 第五层应用程序开发环境. DENSO 公司生产了一种新型机器人控制器 Netw oRC<sup>[11]</sup>, 采用 PC 机结构、网络通信、新的机器人编程语言和带有 GUI 环境的多功能示教板, 并将其应用于 PA-10 机器人的控制, 该机器人的结构分为四层: 机器人本体、伺服驱动、运动控制和操作界面.

在美国, 美国国家航空和宇航局和国家标准化局标准化制定了一个概念模型 NASREM——遥控机器人控制系统结构的参考模型, 是第一个企图完全说明智能系统全部组件的模型. 采用层次结构, 每一层又分为三模块: 任务分解、环境建模和传感信号处理. 这种结构为处理大系统提供了一种标准的方法. 由美国空军赞助、Martin Marietta 公司实施的开放系统结构标准的规范——下一代通用控制器 NGC(Next Generation Controller-NGC)<sup>[12]</sup>. 它包括三个概念: 一是集成化的结构; 二是一组应用程序集; 三是集成/配置环境, 并且采用由术语

——责任(Responsibilities)、要求(Requirement)(输入)和产品(Products)(输出)表示的模块结构来代替应用程序。同时,美国空军为大型飞机的自动化维护和保养,实施了一个多阶段计划——统一遥控机器人结构计划(UTAP),主要目标是开发维护遥作机器人。在系统操作方面包括三个单元。一是对象建模模块,它提供一个硬件和任务环境模型。二是任务描述模块,它提供一个方法来建立任务程序。三是任务执行模块,它完成仿真或驱动装置。硬件结构分为两部分:本地部分和远地部分。同时,也对模型通信方面的实际命令、数据类型和结构进行了比较分析,其目的是将所需的内部数据交换量最小化<sup>[9]</sup>。另外,也进行了结构规范和有效性相关问题的研究。George Saridis 教授提出了智能机器理论<sup>[5]</sup>,这种方法是基于三层控制结构。首先,依照 Boltzman 机器结构建立了组织层(Organization Level)用于抽象推理、任务规划和决策。其次,协调层(Coordination Level)由一个作为协调器的 Petri 网迁移行为(Transducers Acting)的结构组成,该协调器由调度员进行管理。协调层也起向组织层提供接口的作用;最后,执行层由传感器和运动控制硬件组成,它与上面的协调器形成一对一的相互作用。整个结构基于“智能降低、精度增加”的原理。Carnegie Mellon 大学(CMU)发展中心开发了一种基于端口的对象的动态重新配置的软件结构框架,并用于基于传感器的控制系统<sup>[6,7]</sup>。这种方法将面向对象的设计同数字控制系统的端口设计相结合。一个基于端口的对象被定义为具有通信功能端口的对象。每一个端口对象的输入/输出表示一个状态变量串。对其他对象而言,隐藏了内部的状态和方法。该结构框架设置了一个全局状态信息库,所有对象端口变量的状态以表格的形式存放在该库中。Sandia 国家实验室与其他美国能源实验室部门合作,并由 DOE 的机器人技术发展计划(RTDP)资助,开发通用智能系统控制器(GISC)。GISC 采用基于面向通信的概念,并按照这样一种概念,将一组能够相互通信的、具有互补能力的和半自主式的子系统集成为一个复杂的智能系统<sup>[8]</sup>。每一个子系统有定义良好的命令和接口,并且通过各子系统的接口由一个监督控制程序协调系统的整个活动。单独的子系统也具有实时低层次控制功能,可以采用自主方式和异步方式来实现。为了解决非结构环境和突发事件的控制问题,华盛顿大学的 Kevin J. Brady 等教授提出了“基于事件的规划控制”概念,这种规划的优点是对料想不到的环境具有非常强的鲁棒性。并用于多臂遥控机器人的控制<sup>[12]</sup>。

#### 4.3 控制器的其他方面

将目前已经比较成熟的其他领域的知识应用与机器人控制器中,是提高控制器性能和缩短开发周期的有效途径之一。另外,对机器人控制器性能的评价和仿真也正在展开。美国 Cim Flex 技术公司研制了一种将新技术基础和相关方法用于高性能智能控制器的快速开发过程中,即分布式智能控制和管理(DICAM)系统<sup>[4]</sup>。这种通用控制结构结合了面向任务的、带有元控制器的领域控制器,元控制器可以在一个领域控制器内调度活动。本项目包括四个部分:(1)用于智能控制的参考模型的形式化;(2)在开发工作空间中应用程序的构建,在工作空间中系统的要求通过选择设计组件来满足,设计组件是通用参考结构组件的专门化和详细化;(3)应用程序库中再使用模块的构建;(4)丰富大量的开发工具的创建,这些开发工具融合了从软件工程(控制定律说明符、代码发生器、协议、编辑器和调试器)和知识工程(领域模型器、规则管理器、基于知识的设计助理)中的大量技术。意大利的 Luca ferrarin 等教授采用 HYBRICE (Hybrid System Integrated Control Engineering) 仿真软件包对 COMAC C3G-9000 工业机器人控制器进行了模型化和性能分析<sup>[13]</sup>。HYBRICE 是在商业 AutoCAD11.0 上开发的仿真环境,其基于混合系统的功能模型由三个子模型组成:连续时间模型、离散时间模

型和逻辑模型. 连续时间模型用于表示连续时间系统. 离散时间模型和逻辑模型用于描述基于微处理器的分布式控制系统的性能. 同时, 离散时间模型也能够表示连续过程控制器的性能(如 PID 控制器), 而逻辑模型也可以表示可编程逻辑控制器的功能和结构. 离散时间算法采用功能方框图的形式, 或者采用 C 语言代码插入预先定义接口的软件中, 而逻辑控制算法则以 Petri 网的形式给出. 在此基础上, 一个通用的分布式控制系统就可由 HYBRICE 进行性能仿真和评价.

法国的 Mohamed ABID 等教授对软/硬件联合控制关节型机器人进行了研究<sup>[14]</sup>. 该机器人具有 18 台电机, 采用不同的上位机结构和软件对其控制, 分析了不同方案下的实时性和成本, 要求控制周期小于 6ms, 结论如下:

方 案	实时性	成 本
使用 1 个软件处理器的纯软件方案	不满足	满足
使用 2 个软件处理器的纯软件方案	不满足	满足
使用 19 个软件处理器的纯软件方案	满足	不满足
纯硬件方案	满足	满足
硬件/软件混合方案	满足	满足

一些新技术也被应用于机器人控制中, 如法国的 P. RuauX 等教授和 M. Warguia. 等教授采用 CAN 总线技术对移动机器人进行控制. 前者采用 CAN 网络结构对轮式快速移动机器人 ROMEO 进行控制<sup>[15]</sup>, 并提出了一种“分层结构、分布计算”的概念. 后者也将 CAN 网络应用于移动机器人控制<sup>[16]</sup>, 但采用了功能完全分散的方式, 即每一子功能都采用一片微计算机来完成, 通过 CAN 总线将各子系统连接起来.

国内机器人控制器的研究比国外落后很多, 差距比较大. 目前, 主要集中在机器人控制算法和策略上, 而对控制器体系结构方面的研究非常少.

## 5 目前机器人控制器研究的几个方向

### 5.1 开放式结构控制器体系结构的研究

国外在开放式控制器体系结构方面的研究投入了大量的人力、财力和物力. 主要是集中在功能的划分、功能之间的信息交换规范以及实现功能的方法上. 目前, 仍处在“百家争鸣、百花齐放”阶段, 还没有形成一个国际公认的技术标准规范和文件.

在开放式控制器体系结构研究方面, 有两种基本结构: 一种是基于硬件层次划分的结构, 该类型结构比较简单; 另一种是基于功能划分的结构, 它将软硬件一同考虑, 仅从功能上来考虑. 后者是控制器体系结构的研究和发展方向. 目前的研究主要是集中在基于开放式结构体系的功能划分和功能单元的信息交换规范, 而且力图建立一种“完全说明智能系统全部组件的模型”, 以期在国际机器人控制器体系结构和规范的制定方面占据一有利地位.

### 5.2 控制器评价体系和性能仿真的研究

随着机器人控制器体系结构研究的不断深入, 对其评价标准和性能仿真也变得尤为重要, 在这一方面的工作进行的比较缓慢, 较为突出的是意大利的 Luca ferrarinID 教授等开发的 HYBRICE (Hybrid System Integrated Control Engineering) 基于 AutoCAD11.0 平台上的仿

真软件包,它对混合系统的某一特定的性能可以并给出定量的评价。

控制器的性能包括内部和外部两个方面,实际上内部指标决定系统外部的性能,如何确定各功能单元执行的延迟时间、单元之间信息的交换时间、交换信息的频度、协调作用的强弱、突发事件处理能力以及影响系统性能的瓶颈等等,必须有一种方法来给出定量性的说明和结构的优化途径,它通常包括了控制器的性能模型、在线或离线性能分析和性能预估应用程序。

### 5.3 多算法融合的研究

机器人控制算法不同于一般的控制系统,典型的自动控制系统的的设计是针对具体的系统,或采用经典控制理论或采用现代控制理论或离散控制理论或模糊控制理论等,或者几种方法的组合但不同时进行控制,机器人控制算法几乎都是几种控制方法的融合,融合意味这同时,如底层采用连续的 PID 控制、中间层采用逻辑控制、上层是智能控制,这种系统的稳定性怎样判断?动态性能如何分析?

### 5.4 通用交互式图形化人机界面的研制

目前,国外对机器人控制器的研究主要集中在功能方面,也即软件方面的研究和开发,特别是,通用交互式图形化人机界面的开发已越来越受到重视,它是机器人技术实用化关键技术之一,目前的人机交互界面要么是手持操作器和带操作的示教板,要么是键盘驱动或鼠标驱动的固定式菜单和弹出式菜单,相对在工业中常用的组态软件如 INTOUCH、FIX 等图形化操作要落后的多,通用交互式图形化人机界面开发难度很大,一方面它有赖于开放结构规范的建立,而目前仍未形成一个统一的、公认的技术规范;另一方面是机器人多样性和复杂性决定的,如机器人种类不同功能就各异、环境模型难于统一、控制算法复杂多样等等,但是,对某一类型的机器人,特别是已经开始实用化的机器人,还是比较有益的。

通用交互式图形化人机界面通常是基于实时多任务操作系统,主要包括两个部分:开发环境和应用环境,开发环境为应用环境提供一个开发平台,用户可以根据自己的要求,在开发环境下采用交互式图形界面,组合满足要求的应用程序,并可通过应用环境编译为可直接运行的程序。

## 参 考 文 献

- 1 Luca Ferrarini, Gianni, Ferretti, Claudio, Maffezzoni & Gian Antonio Magnani, Hybrid Modeling and Simulation for the Design of an Advanced Industrial Robot Controller. IEEE Robotics & Automation Magazine, June 1997
- 2 William E. Ford, What is an Open Architecture Robot Controller? 1994 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Columbus, Ohio, USA, 1994. 16- 18
- 3 Sorensen S. Overview of a Modular Industry Standards Based Open Architecture Machine Controller. Proceedings of the International Robots and Vision Automation Conference, Detroit, MI, 1993, April 5- 8
- 4 Hayes-Roth F, Emman L D, Terry A, Hayes-Roth B. Domain-Specific Software Architectures: Distributed Intelligent Control and Communication. IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design, Napa, CA, March 1992
- 5 Saridis G N. Architecture for Intelligent Control. IEEE Symposium on Implicit and Nonlinear Systems. Ft. Worth, TX, 1992, December 14- 15
- 6 Stewart D B, Volpe R A, Khosla P K. Integration of Real-time Software Modules for Reconfigurable Sensor-based Control Systems. Proceedings 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Raleigh, NC, 1992, July 7- 10
- 7 Stewart D B, Volpe R A, Khosla P K. Design of Dynamically Reconfigurable Real-time Software using Port-based

- Objects, Submitted to IEEE Transaction on Software Engineering, 1993, July 1
- 8 Griesmeyer J M, McDonald M J, Harrigan R W, Butler P L, Rigdon B. Generic Intelligent System Controller(GISC). Sandia Internal Report, SAND92- 2159, Sandia National Laboratories-New Mexico, October 1992
  - 9 Griesmeyer J M. General Interface for Supervisor and Subsystems(GENISAS). Sandia Internal Report, SAND92- 2159, Sandia National Laboratories-New Mexico, October 1992
  - 10 Miller D J, Lennox R C. An Object-Oriented Environment for Robot System Architectures. IEEE Control System, 1991, 11(2)
  - 11 小山俊彦. Distributed Open Robot Controller NetwoRC. Robot, 1998, (121)
  - 12 Kevin J. Brady, Robert J. Anderson, Ning Xi, Tzyh-Jong Tam, Modular Controller Architecture for Multi-Arm Telerobotic System. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota-April, 1996
  - 13 Luca Ferrarini, Gianni Ferretti, Claudio Maffezzoni, Gian Antonio Magnani. Hybrid Modeling and Simulation for the Design of an Advanced Industrial Robot Controller. IEEE Robotics & Automation Magazine, June 1997
  - 14 Mohamed ABID, Adel CHANGUEL, Ahmed JERRAYA. A Hardware/Software Codesign Case Study: Design of a Robot Arm Controller. Proceedings of the 1996 European Design & Test Conference IEEE, 1996
  - 15 P. Ruaux, G. Bourdon, S. Delaplace, N. Pons, J. Rabit. A Rapid Mobile Robot Synthesis. Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics IEEE, 1995
  - 16 Wargui M, Rachid A. Application of Controller Area Network to Mobile Robots. Proceedings of the 1996 8th Mediterranean Electrotechnical Conference IEEE at MELECON, 1996

## STATUS AND DEVELOPMENT ABOUT RESEARCHES ON ARCHITECTURE OF ROBOTIC CONTROLLER

LI Kai-sheng<sup>1</sup> ZHANG Hu-hui<sup>1</sup> FEI-Renyuan<sup>1</sup> ZHONG Guang-hua<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology of Beijing Polytechnic University 100022;

2. Institute of Robotics Research of Beijing University of Aero & Astronautics 100083)

**Abstract:** This paper presents the definition and the classification of robotic controller and introduces the status about researches on architecture of robotic controller. It also puts forth several development directions towards the researches on robotic architecture.

**Keywords:** Controller, architecture, robot

作者简介:

李开生 (1961-), 男. 研究领域: 机器人自动控制技术, 计算机控制.

张慧慧 (1943-), 女. 研究领域: 机器人技术, 气动控制技术及液压控制.

费仁元 (1938-), 男. 研究领域: 制造系统监控及机器人技术.