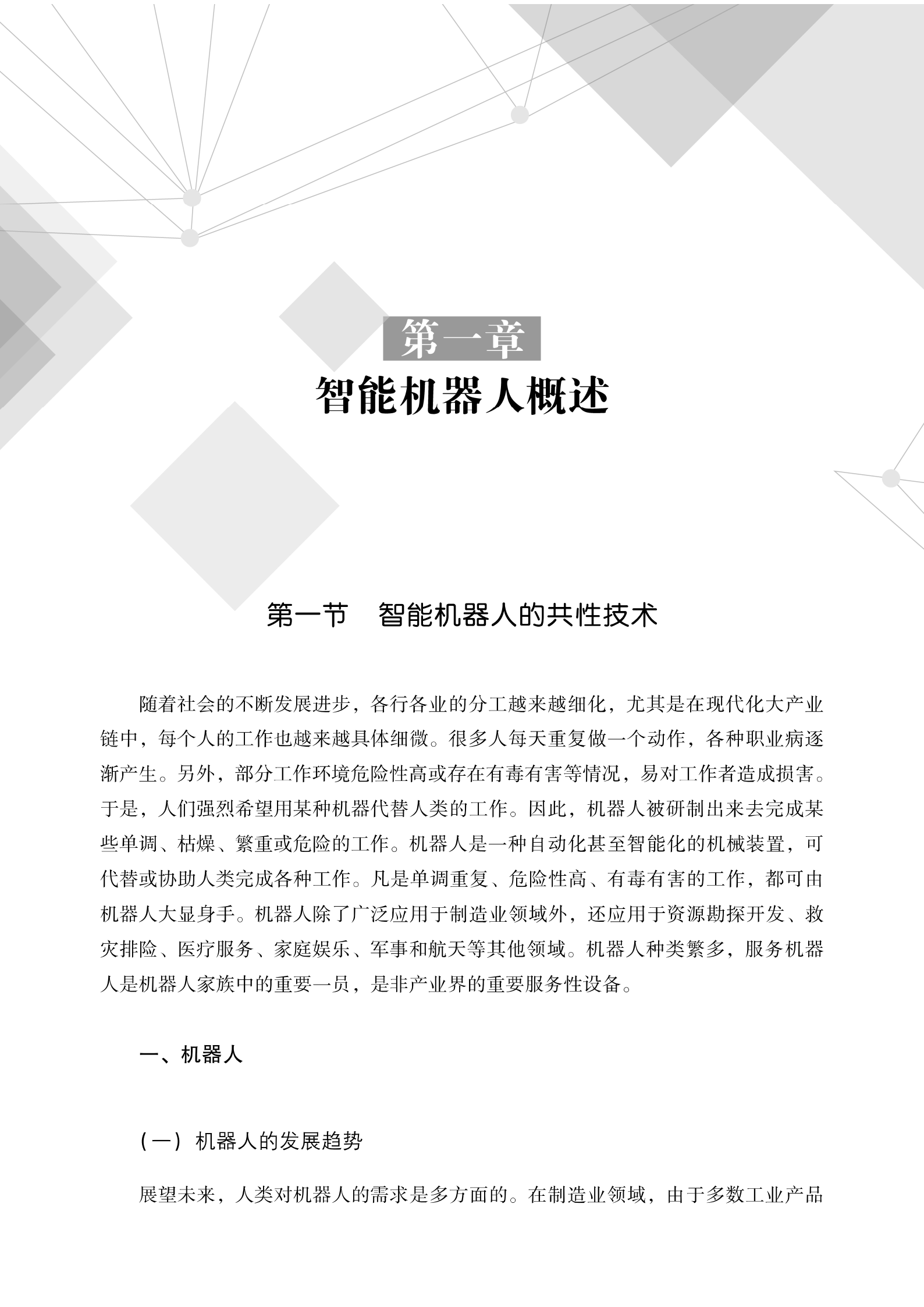


目 录

第一章 智能机器人概述	1
第一节 智能机器人的共性技术	1
第二节 智能机器人设计与开发	11
第三节 智能服务机器人的发展趋势	24
第二章 智能服务机器人结构设计	29
第一节 智能服务机器人结构方案	29
第二节 智能服务机器人机械臂运动学分析	38
第三节 机械臂轨迹规划及控制研究	46
第四节 移动机械臂目标抓取轨迹规划与设计	56
第三章 智能服务机器人的控制系统	101
第一节 服务机器人的控制	101
第二节 服务机器人的自主移动技术	108
第三节 服务机器人的控制系统	109
第四节 多机器人的控制	111
第五节 服务机器人远程控制	122
第四章 智能服务机器人的智能感知系统	139
第一节 服务机器人智能感知系统的定义与组成	139

第二节	服务机器人的感觉与传感器	141
第三节	机器人学与人工智能	162
第四节	机器人的感知意识	166
第五章	智能服务机器人语音交互系统	173
第一节	机器人语音交互功能的基础理论	173
第二节	机器人语音交互功能的实现——PocketSphinx	183
第六章	基于嵌入式 GPU 的智能服务机器人视觉系统软件设计	190
第一节	软件总体设计	190
第二节	视觉检测模块设计	197
第三节	人机交互模块设计	207
第四节	视觉测距模块设计	218
参考文献		227



第一章

智能机器人概述

第一节 智能机器人的共性技术

随着社会的不断发展进步，各行各业的分工越来越细化，尤其是在现代化大产业链中，每个人的工作也越来越具体细微。很多人每天重复做一个动作，各种职业病逐渐产生。另外，部分工作环境危险性高或存在有毒有害等情况，易对工作者造成损害。于是，人们强烈希望用某种机器代替人类的工作。因此，机器人被研制出来去完成某些单调、枯燥、繁重或危险的工作。机器人是一种自动化甚至智能化的机械装置，可代替或协助人类完成各种工作。凡是单调重复、危险性高、有毒有害的工作，都可由机器人大显身手。机器人除了广泛应用于制造业领域外，还应用于资源勘探开发、救灾排险、医疗服务、家庭娱乐、军事和航天等其他领域。机器人种类繁多，服务机器人是机器人家族中的重要一员，是非产业界的重要服务性设备。

一、机器人

（一）机器人的发展趋势

展望未来，人类对机器人的需求是多方面的。在制造业领域，由于多数工业产品

的商品寿命逐渐缩短，品种更加多样化，促使产品的生产从传统的单一品种成批量生产逐步向多品种小批量柔性生产过渡。由各种加工装备、机器人、物料传送装置和自动化仓库组成的柔性制造系统，以及由计算机统一调度的更大规模的集成制造系统将逐步成为制造业的主要生产手段之一。

现在工业上运行的大多数机器人都不具有智能。随着工业机器人数量的快速增长和工业生产的发展，人类对机器人的工作能力提出了更高的要求，特别是需要各种具有不同智能程度的机器人和特种机器人。它们有的能够模拟人类用两条腿走路，可在凹凸不平的地面上行走移动；有的具有视觉和触觉功能，能够进行独立操作、自动装配和产品检验；有的具有独立的控制和决策能力。

服务机器人是机器人家族中的重要一员，目前应用越来越广泛，且正在向智能化方向发展。智能服务机器人作为机器人产业的新兴领域，高度融合智能、传感、网络、云计算等创新技术，与移动互联网的新业态、新模式相结合，为促进生活智慧化、推动产业转型提供了突破口，引领服务模式实现“互联网+”变革。在技术层面，智能服务机器人将在人工智能和云计算方面实现进一步突破。人工智能是服务型机器人的“大脑”，机器人在非结构化环境下的识别、思考和决策能力，直接决定了机器人的智慧化程度。目前，全球各大科技巨头在人工智能研究方面持续投入，促使机器人智能服务机器人更好地实现人机互动。云计算是服务型机器人的“平台”，是实现机器人与移动互联网海量数据连接的纽带，能够完成实时信息搜索和信息提取，直接决定了机器人的应用延伸拓展水平。当前，采用云计算的智能服务机器人日益增多，未来可能成为服务机器人技术的“标准配置”。

（二）机器人的定义与特点

1. 机器人定义

在科技界，科学家会给每一个技术名词下一个明确的定义，但是机器人已经出现几十年了，对于机器人的定义还是众说纷纭，没有一个统一的概念。其中一个原因是机器人还在发展，新的型号和功能不断出现。而根本原因是机器人涉及人类的概念，成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人这个词最初诞生于科幻小说一样，人们对机器人充满了幻想。正因为对机器人的定义比较模糊，人们才有了足够的想象力和创作空间。

由于涉及对“人”的概念的理解差异，国际学术界至今对机器人仍没有统一的定

义，不同的学者根据自己的研究方向各有侧重的说法，不同国家也有各自的习惯解释。

①机器人是一种柔性机器，具有移动性、个性化、智能化、多功能、半机械、半人、自动化和奴役性等特点。②机器人是由能工作的手、能行动的脚步和有意识的头脑组成的个体。还具有非接触式传感器（相当于人的眼睛和耳朵）、接触式传感器（相当于人的皮肤）、固有感、平衡感等感觉器官和能力。③机器人是具有存储和末端执行器的通用机器，可以通过自动动作代替人工劳动。④机器人是一种多功能机械手，用于移动各种材料、零件、工具和专用装置，通过可编程的动作执行各种任务，具有编程能力。国际标准化组织 ISO（International Standard Organization）采用了美国机器人工业协会的定义。

我国科学家对机器人的定义：机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器人具有一些与人或生物相似的智能能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协作能力，是一种具有高度灵活性的自动化机器。而与之对应的机器人学则是一门研究机器人的设计、制造和使用的学科。

2. 机器人三原则

人类制造机器人主要是为了让它们代替人们做一些有危险、难以胜任或不宜长期进行的工作。

为了发展机器人，避免人类受到伤害，美国科幻作家阿西莫夫在 1940 年发表的小说《我是机器人》中首次提出了“机器人三原则”：

①第一原则。机器人必须不能伤害人类，也不允许见到人类将要受伤害而袖手旁观。

②第二原则。机器人必须完全服从于人类的命令，但不能违反第一原则。

③第三原则。机器人应保护自身的安全，但不能违反第一和第二原则。

在后来的小说中，阿西莫夫补充了第零原则。

④第零原则。机器人不得伤害人类的整体利益，也不得通过不采取行动，让人类利益受到伤害。

这 4 条原则被广泛作为现实和科幻中的机器人准则。

3. 机器人能力评价指标

①智能（感觉和感知），即记忆、运算、比较、鉴别、判断、决策、学习、推理等。

②机能，是指变通性、通用性或空间占有性等。

③物理能，是指力、速度、寿命、可靠性、通用性、连续运行能力等。

(三) 机器人的分类

根据机器人的应用环境，国际机器人联盟（FR）将机器人分为工业机器人和服务机器人。机器人分类和主要应用领域如图 1-1 所示。

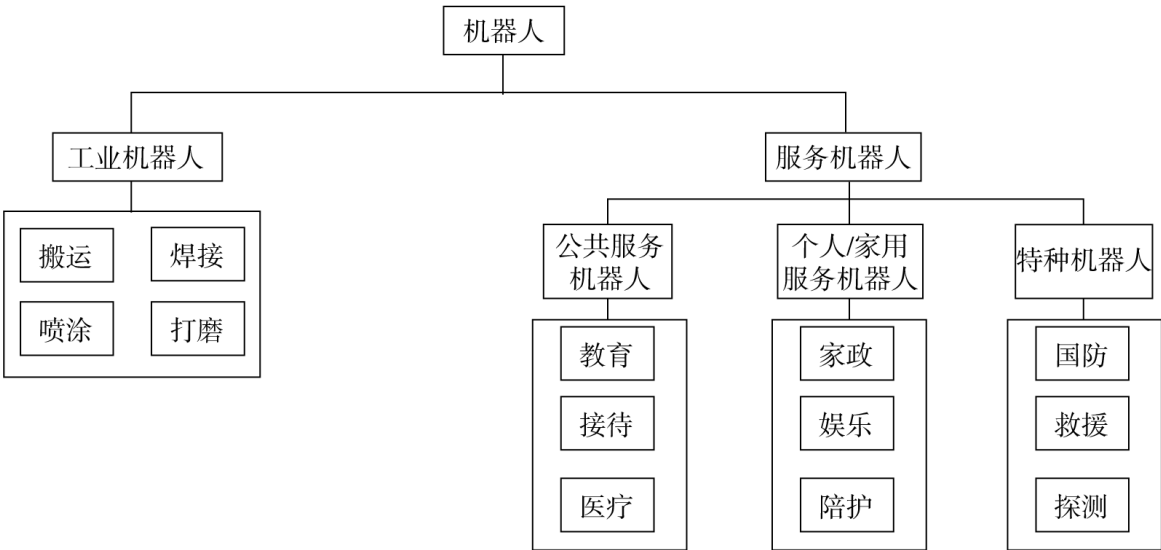


图 1-1 机器人分类和主要应用领域

1. 工业机器人

工业机器人是在工业生产中使用的机器人的总称，主要用于完成工业生产中的某些作业。

工业机器人的种类较多，常用的有搬运机器人、焊接机器人、喷涂机器人、打磨机器人等。

2. 服务机器人

服务机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种机器人的总称。服务机器人可进一步分为 3 类：公共服务机器人、个人/家用服务机器人、特种机器人。

(1) 公共服务机器人

公共服务机器人是指面向公众或商业任务的服务机器人，包括迎宾机器人、餐厅服务机器人、银行服务机器人、教育服务机器人、医疗服务机器人等。

(2) 个人/家用服务机器人

个人/家用服务机器人是指在家庭以及类似环境中由非专业人士使用的服务机器人，包括家政、娱乐、老人陪护、个人运输、安防监控等类型的机器人。

（3）特种机器人

特种机器人是指由具有专业知识人士操纵的，面向国家、特种任务的服务机器人，包括国防/军事机器人、航空航天机器人、搜救救援机器人、医用机器人、水下作业机器人、空间探测机器人、农场作业机器人、排爆机器人、管道检测机器人和消防机器人等。

（四）机器人的组成及其功能

大部分机器人由驱动系统、传感系统、执行系统、控制系统、软件及决策系统、人-机器人-环境交互系统等六大系统构成。

驱动系统是使机器人运作起来的驱动装置。在驱动系统的作用下机器人各个关节能够按设定的运动自由度工作。驱动系统分为液压驱动、气动驱动、电动驱动或各种驱动的组合。驱动可以是直接驱动或通过机械传动机构如同步带、链条、齿轮系和谐波齿轮的间接驱动。

传感系统由内部传感器模块和外部传感器模块组成，用于获取内外环境状态下所需的信息。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能性。

工业机器人的执行系统由机座、手臂、末端操作器三大部分组成，每一个大件都有若干个自由度的机械系统。若基座具备行走机构，则构成行走机器人；若基座不具备行走及弯腰机构，则构成单机器人臂。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在水腕上的一个重要部件，它可以是二手指或多手指的手抓，也可以是喷漆枪、焊具等作业工具。

控制系统的任务是根据机器人的操作指令程序和传感器反馈的信号，控制机器人的执行机构完成规定的动作和功能。如果工业机器人不具有信息反馈特征，则为开环控制系统；若具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。根据控制原理，控制系统可分为程序控制系统、适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运行的形式，控制系统可分为点位控制系统和轨迹控制系统。

二、服务机器人

（一）服务机器人的发展历程

在国外，服务机器人产品的研发起步较早。以欧洲康复机器人为代表的服务机器人研究起源于20世纪70年代。20世纪80年代，荷兰研制出一种安装在茶盘上的实验型机械手，主要用于送料和翻书。Manus机器人的研究始于1984年，其手臂包含5个自由度。经过几年的测试，由荷兰的Exact Dynamics BV公司生产并投入市场。20世纪80年代，英国人Mike Topping开发了Handy1康复机器人的原型，使一名11岁的脑瘫男孩能够独立进食。美国斯坦福大学研发的MOVAR机器人可以穿行于每一个房间，其机械手配备了强大的力传感器和接近觉传感器，保证了其安全性和可靠性。20世纪90年代，美国运输研究公司（TRC）推出了第一款服务机器人产品——医院护士助理机器人。20世纪90年代，本田公司推出令世人惊叹的仿人机器人P2，该机器人不但具有与人相仿的外形，而且能够完成与人的简单交流，能够独立演奏钢琴。20世纪90年代，在日本举行的国际机器人展览会上，Sony公司首次公开展示了机器狗“爱宝”。21世纪，世界第一届机器人会议在日本福冈市落下帷幕，会议发表了《世界机器人宣言》，与会代表一致认为，机器人领域正经历着从产业用机器人时代向生活用机器人时代的转变。

我国对服务机器人的研究起步较晚。20世纪90年代中期，服务机器人技术得到国内科研人员的关注，近年来，在国家“863计划”的支持下，我国在服务机器人的研究和产品研发方面开展了大量的工作，并取得了一定成绩。20世纪90年代，清华大学开发了一个7自由度移动式护理机器人，以高位截瘫人员作为护理对象；北京航空航天大学、清华大学和海军总医院共同研制了用于脑外科手术的机器人；哈尔滨工业大学研制了“导游机器人”“迎宾机器人”“清扫机器人”“护理助手”和智能服务机器人“青青”等；21世纪，华南理工大学研制出了一张机器人护理病床；中国科学院自动化研究所研究出了护士助手机器人“艾姆”、智能保安机器人及智能轮椅等。21世纪，我国“863计划”先进制造与自动化技术领域办公室和国家自然科学基金委联合组织召开了智能服务机器人战略研讨会。会上，国内外相关领域的20多位专家应邀做了报告，重点围绕世界服务机器人的发展动态、我国服务机器人的发展方向及

“十一五”期间机器人技术的发展重点等问题进行深入研究，将家用服务机器人的研发定为重要的发展目标。

（二）服务机器人的定义及特点

1. 服务机器人定义

服务机器人是机器人家族中年轻的一员，至今没有严格的定义。不同的国家对服务机器人有不同的理解。服务机器人的应用非常广泛，主要包括维护、修理、运输、清洁、安保、救援、监控等。

国际机器人联合会（International Federation of Robotics, IFR）给出了服务机器人的初步定义：服务机器人是一种半自主或全自主的机器人，能够完成有益于人类的服务工作，但不包括从事生产的设备。欧美大部分国家都采用这个定义。但亚洲很多国家认为，服务机器人是一种以半自主或全自主方式运行，完成对人类福利和设备有用的服务（制造作业除外）的机器人。这种定义所包含的机器人的范围更小，但更贴近普通人的理解。还有其他一些关于服务机器人的定义，例如：服务机器人是能在日常环境中完成对人类活动有用的服务的、基于传感器的、可预编程的机电一体化设备。

我国对服务机器人的定义较窄，主要指用于为人类提供服务的全自主或半自主机器人，包括清洁机器人、家用机器人、娱乐机器人、医疗和康复机器人、老年人和残疾人护理机器人、办公和后勤服务机器人、餐饮服务机器人等。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中给出了智能服务机器人的定义：智能服务机器人是在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术集成的智能化设备。

广义而言，服务机器人是指除工业机器人以外的各类机器人，主要应用于服务业，包括室内机器人和室外机器人。狭义的服务机器人一般只包括家庭服务机器人、教育娱乐机器人等，但不包括医疗机器人。

2. 服务机器人的特点

随着技术的不断进步，人们对服务机器人的要求也越来越高。人们设计出各种服务机器人来满足不同场合和不同层次的需求。与工业机器人相比，服务机器人有其自身的特点，如体积小、重量轻、灵活性高、操作简便、适应性强、智能化程度高等。具体来说，服务机器人的特点主要包括以下几个方面。

（1）可移动性

为了在某个区域工作或执行某项特殊任务，服务机器人一般都具有一定的行走功

能。服务机器人的可移动性通常由具体的运动机构来实现，如轮式机构、履带式机构、多足机构、可重构机构及复合机构等。服务机器人的可移动性有效拓展了其作业空间。

（2）轻便性

由于服务机器人的功能更多，机构也更多，所以要求尽可能降低其自重和体积，以降低能耗，增加机动性。服务机器人的传动装置和控制装置也趋于轻量化，尽可能减少中间传动机构，提高机械传动效率。

（3）易操作性

服务机器人的操作对象主要是那些不具备专业知识的人，因此，要求服务机器人的操作尽可能简单、直接。

（4）适应性

适应性要求服务机器人不但能够在已知的环境中很好地工作，同时也能够对作业过程中所遇到的位置环境做出合理的适应性反应，如发现障碍物并自行回避等。

（5）智能性

随着技术的不断发展及社会需求的不断提高，智能化已成为服务机器人发展的重要趋势，智能化要求服务机器人具有一定的学习、感觉和判断能力，并广泛采用高性能的视觉、听觉、触觉等多种传感器，使其具有感知能力和自主能力。

（6）交互性

服务机器人与人的关系十分密切。两者之间需要进行信息交流、协调、合作。因此，要求服务机器人具有较好的交互性，使人与服务机器人之间的沟通更为方便、快捷。

（三）服务机器人的构成及其功能

虽然服务机器人种类繁多、形式多样、功能各异，但一个完整的服务机器人系统通常由以下几部分组成：本体结构、控制系统、决策系统、执行机构、感知系统、人机交互、能源供给等。

用户通过人机交互系统将任务传达给服务机器人，高层的决策系统通过融合感知系统传送的数据信息，确定机器人所处的外部环境状态、机器人的运动状态，并据此做出决策。依据决策结果，由控制系统选择合适的控制策略，并输出相应的控制指令，通过执行机构来驱动机器人本体结构的运动，以实现预定的工作任务。在任务执行过程中，内传感器通过力传感器、位置传感器、测速计、光电编码器、陀螺仪等实现对

机器人运动状态的描述；传感器通过红外传感器、激光传感器、超声波传感器、视觉传感器、微波雷达等感知外界工作环境信息。传感系统将获取的机器人运动状态和工作环境状态反馈给系统的决策层，作为决策依据。人机交互与决策系统之间存在双向信息传递。一方面，操作者通过人机交互系统将任务指令传递给机器人；另一方面，决策层将机器人系统的运行状态和外部工作环境状态实时传输到人机交互系统，并通过可视化技术显示在人机交互界面上。决策层与控制系统之间还有双向的信息传递：决策层将决策结果传递给控制系统，作为控制系统运行的依据；同时，控制系统会将执行结果反馈给决策层，以供参考和调整。

我国服务机器人目前已初步形成了水下自主机器人、消防机器人、搜救/排爆机器人、仿人机器人、医疗机器人、机器人护理床和智能轮椅、烹饪机器人等系列产品，展示出一定的市场前景。仿人机器人进入北京与广州科技馆，体现了综合技术世界前列的水平，其中北京理工大学研制的“汇童”BHR及浙江大学研制的Wu & Kong仿人机器人连续对打乒乓球最高可达110回合，机器人与人对打最高可达140回合，其中的相关传感、伺服、驱动控制技术也得到了发展。由中国科学技术大学自主研发的智能服务机器人“可佳”，具有自然语言人机交互、自动推理与知识获取、环境感知与建模、机器人控制等核心技术，于2013~2015连续三年获得国际服务机器人标准测试总分第一。在国际人工智能第一大期刊*Artificial Intelligence*发表的国际家用服务机器人十年总结文章中：“可佳”被评为目前国际服务机器人两大主流认知智能技术之首。

在水下机器人方面，由中国船舶重工集团公司702所、中国科学院沈阳自动化研究所和声学研究所等多家国内科研机构与企业联合攻关，攻克了中国在深海技术领域的近底自动航行和悬停定位、高速水声通信、充油银锌蓄电池容量等一系列技术难关，设计完成的7000 m级“蛟龙号”顺利完成了5000 m海试。另外，北京航空航天大学机器人研究所在仿生水下机器鱼方面取得了进展，研制的SPC系列机器鱼在长航时、高机动性等方面获得突破，并应用于水质检测。

在工业机器人研究方面，以企业研究成果为主，如沈阳新松机器人自动化股份有限公司在焊接机器人及自动导引车（AGV）等方面取得重要市场突破；哈尔滨博实自动化股份有限公司主要在自动包装与码垛机器人方面进行相关机器人产品开发；广州数控设备有限公司研发了自主知识产权的RB系列工业机器人；昆山华恒焊接股份有限公司侧重于焊接机器人研究；上海沃迪科技联合上海交通大学机器人研究所成功研

制了码垛机器人并推向市场。值得一提的是，天津大学在并联机器人上取得了重要进展，相关技术获得美国专利。另外，安徽巨一科技股份有限公司、哈尔滨海尔哈工大机器人技术有限公司、常州铭赛机器人科技股份有限公司、苏州博实昌久设备有限公司、南京埃斯顿自动化股份有限公司、埃夫特智能装备股份有限公司、北京博创兴盛科技有限公司、青岛科捷自动化设备有限公司等在工业机器人整体或核心部件方面也进行了研究和市场化产业推广。

在医疗康复机器人研究方面，北航机器人研究所联合海军总医院，在国内率先开展了医疗脑外科机器人研究，突破了机器人机构综合与优化、医学图像处理、导航定位、手术规划等关键技术。创伤用模块化骨科机器人已获得医疗器械许可证，血管介入机器人也已开展临床动物实验。重庆金山科技集团于 21 世纪初开始在国内最先研发胶囊内镜微机电系统，突破了低功耗图像采集与处理系统设计、近距宽景非球面镜头设计、无线传输设计和封装工艺等关键技术，于 2004 年初研制成功原理样机并于 2005 年实现产品定型。此外，哈尔滨工业大学机器人所及天津大学也在微创、腹腔外科手术机器人等领域进行了相关研究工作。

在教育机器人研究推广方面，上海未来伙伴机器人有限公司推出全球第一台教育机器人产品——AS-MII 能力风暴机器人。北京博创兴盛科技有限公司成功研制了面向高校机器人技术教育的“创意之星”模块化机器人教学套件及“未来之星”移动机器人平台。

在反恐排爆危险作业机器人研究应用方面，北京博创兴盛科技有限公司研制成功的反恐排爆机器人及车底检查机器人成功应用于北京奥运会及亚运会。沈阳自动化研究所成功研制了可携带侦察机器人、反恐防暴系列机器人、旋翼飞行机器人、超高压输电线路巡检机器人系统等多款特殊环境下的工作机器人。

值得一提的是，我国在极地科考机器人方面也进行了研究，包括冰雪面移动机器人及低空飞行机器人已经在南极科考中得到了应用。而且，国家自然科学基金委员会启动了视听觉信息的“认知计算”重大研究计划，国内多家研究单位进行了智能无人车辆的研究，并举行了中国智能车未来挑战赛，在相关智能感知技术方面获得了突破。

三、服务机器人共性技术

服务机器人的研究内容主要包括以下几个方面：机械结构设计与驱动、感知系统

与技术、控制技术、人机工程、应用研究等。

机械结构设计与驱动包括移动方式的选择与移动结构的设计、新型机构的设计与应用、新型材料的应用、运动学分析、机械结构优化、能源供应、结构系统可靠性、稳定性分析。感知系统与技术包括新型传感器的开发、传感器选型、多传感数据信息融合技术、机器人的定位技术、机器人的导航技术、人工智能技术。控制技术包括控制系统的构成、驱动装置设计、动力学分析、控制算法、远程控制、路径规划、多智能体控制技术、控制系统仿真。人机工程包括人机工程的设计原则、人机界面、语音识别技术。应用研究主要涉及系统性能评价体系、服务机器人的实用效益评估两个方面。

服务机器人技术包括产业发展共性关键技术和前沿创新技术。产业发展共性关键技术包括产品创新与性能优化设计和模块化/标准化体系结构设计, 标准化、模块化、高性能、低成本的执行结构, 智能传感与人机交互系统, 动力源/驱动/传动系统, 系统集成与应用和性能测试规范与维护技术等。前沿创新技术包括仿生材料与结构一体化设计, 精密微纳操作, 多自由度灵巧操作, 执行机构与一体化设计, 非结构环境下的动力学与智能控制, 复杂环境下机器人动力学问题, 生肌电激励与控制, 非结构环境认识与导航规划, 故障自诊断与自修复, 人类情感与运动感知理解, 智能认识与感知, 人类语义识别与提取, 记忆和智能推理, 多模式人机交互, 多机器人协同作业, 自重构机器人, 网络化交互及微纳系统等方面。仿生皮肤、人工肌肉、结构驱动一体化是当前及未来服务机器人发展的重要课题。

第二节 智能机器人设计与开发

智能机器人是一种具有高度自规划、自组织、自适应能力, 适合在复杂环境中工作的自主式移动机器人。智能机器人的目标是在没有人的干预、无须对环境做任何规定和改变的条件下, 有目的地移动和完成相关任务。随着计算机技术和人工智能技术及传感技术的迅速发展, 智能机器人系统的研究具备了坚实的技术基础和良好的发展前景。

一个理想化的、完善的智能机器人系统通常由 3 个部分组成: 移动机构、感知系统和控制系统。目前对智能机器人的发展影响较大的关键技术是编程语言与编程方式、传感器技术、智能控制技术、路径规划技术、导航和避障技术及人机接口技术等。本节将主要介绍智能机器人的设计和开发相关问题。

一、智能机器人设计的基本步骤

（一）需求分析

在进行智能机器人设计之前，首先需要进行需求分析，即明确智能机器人需要实现哪些功能，然后收集资料进行可行性分析。

（二）方案选择

根据需求分析，进行原理设计并制定方案，包括硬件方案、软件方案等。对比各方案的优缺点，需要从技术的先进性、实现的难易程度、经济性等几个方面综合考虑，确定最终的设计方案。

（三）准备材料

按照智能机器人的功能要求和工作环境，并根据最终的设计方案准备相应材料，此阶段应该对材料的组合方式、机器人功能的实现原理有清楚的构思。

（四）机器人实现

机器人实现包括硬件实现和软件实现两部分，部分工作可以同时进行，例如，核心算法实现因为时间较长，可以跟硬件实现工作同时开展，必要的时候可以利用仿真平台进行仿真测试。动作执行功能方面的程序则可以在硬件完成之后再进行开发。

（五）调试和完善

对机器人进行调试、修改、完善。每一件产品的生产完成后都要对其各项性能指标进行测试和调试。

二、机器人硬件设计与开发

智能机器人的设计与开发是一个基于计算机技术，并将机械、电子、控制等技术与信息技术的应用有机组合的综合应用实践。它充分体现了技术世界的奥妙与神奇，

实践性强、挑战性大、涉及面广。

下面简单介绍一种智能机器人设计方案所需的主要硬件及相关传感器，该方案没有采用一般智能机器人所使用的单片机系统，而是采用了通用 PC 主板作为整个智能机器人的控制器，这样有助于硬件系统的快速集成。

（一）主板

当前，计算机 CPU、内存等硬件的发展速度越来越快，系统的集成度越来越高，Windows 系统、UNIX 系统越来越普及，可视化的编程环境、产业化的软件开发——智能机器人领域越来越看重 PC 的发展。目前，许多机器人硬件设计尝试用通用 PC 主板来设计智能机器人的“大脑”。

主板是整个系统结构的承载者，因此选择一块好的主板对智能机器人的性能起很大的决定作用。选择主板时，要考虑主板芯片在目前市场上的适用性和以后的兼容性。内存结构应该选择 DDR 结构，使内存与 CPU 传输速度间的瓶颈得到较好的解决。考虑到 PCI 总线技术比较成熟，速率较高，而且稳定性比 USB 好，所以尽量选用 PCI 总线，但同时主板也要带有 USB 接口、COMPORT 接口等，为将来智能机器人提供周边设备的扩展做准备。总线扩展槽至少要有 3 个才能满足智能机器人硬件的基本要求：PCI 图像处理卡、数据采集卡、网卡等。

另外，在达到以上要求的同时，还要考虑主板最后要和智能机器人进行整合，成为智能机器人的内核，因此主板的尺寸不能太大，以方便放入智能机器人内部。

（二）数据采集卡

多功能数据采集卡是智能机器人外部传感器和智能机器人内核联系中介。智能机器人外部连接的各类传感器通过数据采集卡的数字端口将采集到的数据送到智能机器人内部，为智能机器人的移动和各种其他功能提供基础数据。

多功能数据采集卡可以选用基于 PCI 总线数据采集与控制板 PCL64AD，为 64 通道高增益多功能即插即用型，可用于采集红外线传感器、光敏传感器、碰撞传感器、温度传感器、气体传感器等数据。其产品规格如下：32 位 PC 总线，即插即用；64 路单端或者 32 路双端模拟输入通道；双极性模拟输入范围；板上 A/D 1KB 的 FIFO 内存；自动扫描通道选择；最高至 100 kHz 采样速率；可编程增益×1、×10、×100、×1 000；3 种触发模式（软件触发、定时器触发和外部触发）；16 通道 DI 和 16 通道 DO；紧凑型，半长 PCB。

（三）传感器

为了让智能机器人正常工作，必须对智能机器人的位置、姿态、速度和系统内部状态等进行监控，还要感知智能机器人所处的工作环境的静态和动态信息，使得智能机器人相应的工作顺序和操作流程能自然地适应工作环境的变化。

传感器技术的发展对于智能机器人的应用和发展都起到了至关重要的作用。未来传感器技术的发展将主要表现在利用半导体材料和大规模集成电路工艺上，将测量电路和敏感元件结合成一体，以提高传感器的灵敏度、精确度和可靠性，实现小型化、智能化。超小型化、高可靠性及廉价的传感器的出现，将从根本上改变机器人编程及其控制系统的设计。

（四）触摸屏

作为智能机器人，用户和智能机器人之间的交互必不可少。实现人机交互的方式比较多，可以是键盘输入、语音输入等，其中触摸屏输入是常用的方案之一。

触摸屏的基本原理是，当用手指或者其他物体触摸安装在显示器前端的触摸屏时，所触摸的位置（以坐标形式）由触摸屏控制器检测，并且通过接口（如 RS-232 串行口）送到 CPU，从而确定输入的信息。触摸屏系统一般包括触摸屏控制器（卡）和触摸点检测装置两个部分。其中，触摸屏控制器（卡）的主要作用是从触摸点检测装置上接收触摸信息，并且将它转换成触点坐标，再送给 CPU，它同时能接收 CPU 发来的命令并加以执行；触摸点检测装置一般安装在显示器的前端，主要作用是检测用户的触摸位置，并传送给触摸屏控制器（卡）。

目前国内市场上触摸屏有表面声波触摸屏、电阻触摸屏、电容感应触摸屏、红外线触摸屏等，但根据智能机器人所工作的环境和各类触摸屏的特性，人们通常选择电阻触摸屏，电阻触摸屏的屏体部分是一块与显示器表面相匹配的多层复合薄膜，由一层玻璃或者有机玻璃作为基层，表面涂有一层透明的导电层，上面再盖有一层外表面硬化处理、光滑防刮的塑料层，它的内表面也涂有一层透明导电层，在两层导电层之间有许多细小（小于千分之一英寸^①）的透明隔离点把它们隔开绝缘。当手指触摸屏幕时，平常相互绝缘的两层导电层就在触摸点位置相互接触，因其中一面导电层接通

^① 英寸为非法定计量单位，1 英寸=2.54cm。

y 轴方向的 5 V 均匀电压场, 侦测层的电压由零变为非零, 这种接通状态被控制器侦测到后, 进行 A/D 转换, 并将得到的电压值与 5 V 相比即可得到触摸点的 y 轴坐标; 同理得出 x 轴的坐标。

(五) 无线网卡

为了让智能机器人能够为用户提供各种服务, 将智能机器人和互联网连接, 进行必要的数据传输是必不可少的。因为智能机器人需要自由移动, 使用无线通信方式是最佳选择。

常用的无线通信技术包括红外线通信、蓝牙 (Bluetooth)、ZigBee、Wi-Fi、蜂窝网络等, 每种技术各有优缺点。在室内, 移动机器人中常采用无线局域网技术, 其中必不可少地需要用到无线网卡。无线网卡根据接口不同, 主要有 PCMCIA 无线网卡、PCI 无线网卡、MiniPCI 无线网卡、USB 无线网卡、CF/SD 无线网卡几类产品。

(六) 其他硬件设备

近年来, 在包括虚拟环境的人机接口技术方面的研究工作非常活跃, 已开发出各式各样的输入和输出装置, 如三维鼠标、数据手套、快门眼镜、头盔等。同时, 各种具有更好性能的临场感方法相继被提出来, 如具有类似人的器官大小的手、臂和双眼视觉系统等, 利用临境技术建立机器人工作环境, 可以让操作者身临其境进行机器人操作。

三、机器人软件设计与开发

(一) 机器人的软件架构

架构可定义为组件的结构及它们之间的关系, 以及规范其设计和后续进化的原则和指南, 系统架构也可称其为如何实施解决方案的一个策略性设计。另外, 软件工程的基本要求包括模块化、代码可复用、功能可共享。使用通用的框架, 有利于分解开发任务及代码移植。机器人软件同样遵从软件工程的一般规律。简言之, 架构就是如何把机器人的功能打散, 再如何把代码组织起来。

从人类第一台可编程的机器人开发伊始, 架构问题就与之相伴而生。早在 1996

年，Garlan 和 Shaw 在《软件架构：一门新兴学科的展望》中就总结了移动机器人的基本设计需求：①慎思规划和反应式行为；②容许不确定性；③考虑危险；④灵活性强。针对这些要求，他们评估了四种用于移动机器人的架构，包括控制回路（control loop）、分层（layers）、隐式调用（implicit invocation）、黑板（blackboard）。经过了几十年的实践，一些架构逐渐被淘汰，另一些架构逐渐被完善起来。

1. 三种典型结构

（1）SPA 结构

机器人天然的工作模式是“See-Think-Act”，所以自然而然地就形成了“传感-计划-行动”（SPA）结构：从感知进行映射，经由一个内在的世界模型构造，再由此模型规划一系列的行动，最终在真实的环境中执行这些规划。与之对应的软件结构称为经典模型，也称为层次模型、功能模型、工程模型或三层模型，这是一种由上至下执行的可预测的软件结构。

SPA 机器人系统典型的结构中建立有三个抽象层，分别称为行驶层（最低层）、导航层（中间层）、规划层（最高层）。传感器获取的载体数据由下两层预处理后再到达最高“智能”层做出行驶决策，实际的行驶（如导航和低层的行驶功能）交由下面各层执行，最低层再次成为与机器人的接口，将行驶指令发送给机器人的执行器。

缺点：这种方法强调世界模型的构造并以此模型规划行动，而构造符号模型需要大量的计算时间，这对机器人的性能会有显著的影响。另外，规划模型与真实环境的偏差将导致机器人的动作无法达到预期的效果。

（2）基于行为的结构

由于 SPA 系统过于死板，另一种实现方法出现了，即基于行为的方法。基于行为的方法前身是反应式系统，反应式系统并不采用符号表示，却能够生成合理的复合行为。基于行为的机器人方案进一步扩展了简单反应式系统的概念，使得简单的并发行为可以结合起来工作。

基于行为的软件模型是一种由下至上的设计，因而其结果不易预测，每一个机器人功能性（functionality）被封装成一个小的独立的模块，称为一个“行为”，而不是编写一整个大段的代码。因为所有的行为并行执行，所以不需要设置优先级。此种设计的目的之一是易于扩展，例如，便于增加一个新的传感器或向机器人程序里增加一个新的行为特征。所有的行为可以读取载体所有传感器的数据，但当归集众多的行为向执行器产生单一的输出信号时，则会出现问题。

(3) 混合结构

混合系统结合了 SPA 和反应体系的原理，将多种混合系统应用在传感器和电机输出间进行协调来完成任务。混合结构最具吸引力的好处可能是：系统按照有利于完成任务的标准进行设计，而非刻板地遵循某一教条。但再复杂的机构，基本上也都是 SPA 和反应体系的组合。

2. 机器人软件架构范例

机器人软件架构是一个典型的控制回路的层次集，通常包含了高端计算平台上的高级任务规划、运动控制回路以及最终的现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）。在这中间，还有循环控制路径规划、机器人轨迹、障碍避让和许多其他任务。这些控制回路可在不同的计算节点（包括台式计算机、实时操作系统及没有操作系统的自定制处理器）上以不同的速率运行。

在某些时候，系统中的各个部分必须一同运行。通常情况下，这需要在软件和平台间预定义一个非常简单的界面——就如控制和监测方向与速度般简单。共享软件栈的不同层次的传感器数据是一个不错的想法，但会给集成带来相当大的麻烦。每个参与机器人设计的工程师或科学家的理念都有所不同，举例来说，同一个架构对于计算机科学家来说运作良好，而在机械工程师那里可能就无法正常工作。

典型的机器人软件包括驱动程序、平台和算法层组件，而具备用户交互形式的应用包含了用户界面层（该层可能不需要完全自主实现）。

下面以带有机机械手臂的自主移动机器人为例，介绍其软件架构。该软件架构由三至四层系统构成，软件中的每一层只取决于特定的系统、硬件平台或机器人的终极目标，与其上下层的内容完全不相关。

(1) 驱动层（driver layer）

顾名思义，驱动层主要处理机器人操控所需的底层驱动函数。这一层中的组件取决于系统中的传感器和执行器，以及运行着驱动软件的硬件。一般情况下，这一层的模块采集工程单位（位置、速度、力量等）中激励器的设定值，生成底层信号来创建相应的触发，其中可能包括关闭这些设定值循环的代码。同样地，该层的模块还能采集原始传感器数据，将其转换成有用的工程单位，并将传感器值传输至其他架构层。

驱动层可以连接到实际的传感器或激励器，或连接环境仿真器中的 I/O。除了驱动层以外，开发人员无须修改系统中的任何层，就能在仿真和实际硬件之间进行切换。

(2) 平台层 (platform layer)

平台层中的代码对应了机器人的物理硬件配置。该层中底层的信息和完整的高层软件之间能够进行双向转换，频繁地在驱动层和高层算法层之间切换。

(3) 算法层 (algorithm layer)

该层中的组件代表了机器人系统中高层的控制算法。如机器人常用的避障功能，可以使用矢量场直方图 (Vector Field Histogram, VFH) 避障算法，距离数据从平台层发送至距离传感器，再由 VFH 模块接收。VFH 模块的输出数据包含了路径方向，该信息直接发送到平台层上。在平台层上，路径方向输入转向算法，并生成底层代码，然后直接发送到驱动层上的电机上。

在算法层中，每个任务都具有一个高层目标，与平台或物理硬件无关。如果机器人拥有多个高层目标，那么这一层还需包含仲裁来为目标排序。

(4) 用户接口层 (user interface layer)

用户接口层中的应用程序并不需要完全独立，它为机器人和操作员提供了物理互动，或在 PC 主机上显示相关信息。

根据目标硬件不同，软件层可能分布于多个不同目标。在很多情况下，各个层都在一个计算平台上运行。对于不确定的应用程序，软件目标为运行 Windows 或 Linux 系统的单台 PC。对于需要更为严格定时限制的系统，软件目标为单个处理节点，且具备实时操作系统。

目前还有很多方法来构建机器人软件，但是任何设计都需要预先做出考虑与规划，才能适应架构。作为回报，一个定义明确的架构有助于开发人员轻松地并行处理项目，将软件划分成明确的界面层次。此外，将代码划分成具有明确的输入和输出功能的模块有助于今后项目中的代码组件复用。

(二) 机器人编程方式

机器人编程方式是一个大问题，主要包括三种方式，即直接示教方式、离线程序设计方式、机器程序语言方式。

1. 直接示教方式

直接示教方式也称示教再现方式，其具体做法是，使用示教盒，根据作业的需要把机器人相应部件如机械手等送到作业所需要的位置上去，并处于所需要的姿态，然后把这一位置、姿态存储起来。对作业空间的各轨迹点重复上述操作，机器人就把整

个作业程序记忆了下来。工作时，再现上述操作就能使机器人完成预定的作业，同时可以反复同样的作业过程。

直接示教方式的优点是不需要预备知识，不需要复杂的计算机装置，所以被广泛使用，尤其适合单纯的重复性作业，如搬运、喷漆、焊接等。

直接示教方式的缺点是：

- (1) 示教时间长、速度慢；
- (2) 不同的机器人，或者即使是同一个机器人，对于不同的任务都需要重新示教；
- (3) 无法接收感觉信息的反馈；
- (4) 无法控制多台机器人的协调动作。

2. 离线程序设计方式

离线程序设计方式就是使用计算机辅助设计软件，计算出为了完成某一作业，机器人相应部件如机械手等应该运动的位置和姿态，即用 CAD 的方法产生示教数据。这一方式克服了直接示教方式的缺点，对于复杂的作业，或需要给出连续的数据时，采用此方法是比较合适的。

3. 机器程序语言方式

机器程序语言方式就是使用机器人程序设计语言编程，使机器人按程序完成作业。这种方式的优点是：

- (1) 由于用计算机代替了手动示教，提高了编程效率；
- (2) 语言编程与机器人型号无关，编好的程序可供多台机器人或不同型号的机器人使用；
- (3) 可以接收感觉信息；
- (4) 可以协调多台机器人工作；
- (5) 可以引入逻辑判断、决策、规划功能以及人工智能的其他方法。

(三) 机器人程序设计语言

机器人程序设计语言一般是一种专用语言，即用符号来描述机器人的动作。这种语言类似于通常的计算机的程序设计语言，但有所区别。一般所说的计算机语言，仅指语言本身，而机器人语言实际上是一个语言系统。

机器人语言系统既包含语言本身给出作业的指示和动作指示，又包含处理系统——

根据上述指示来控制机器人系统，另外还包括了机器人的工作环境模型。

根据作业描述水平的高低，机器人语言通常分为三级：动作水平级、对象物水平级和作业目标水平级（也称任务级）。动作水平级语言是以机械手的运动作为作业描述的中心，由使手爪从一个位置到另一个位置的一系列命令组成；对象物水平级语言是以部件之间的相互关系为中心来描述作业的，与机器人的动作无关；作业目标水平级语言则是以作业的最终目标状态和机器人动作的一般规则的形式来描述作业的。这种分类法较好地反映了语言的水平和功能，但在级与级之间还有些模糊或混乱，所以，另一种分类法将机器人语言分为五级：操作水平级、原始动作水平级、结构性动作水平级、对象物状态水平级和作业目标水平级。

机器人程序设计语言研究是智能机器人研究的重要方面，这方面现在也有不少成果，人们已经开发出了许多机器人语言。这些语言有汇编型的，如 VAL；有解释型的，如 AML；有编译型的，如 AL、LM 语言；还有自然语言型的，如 AUTOPASS 等。近年来，机器人程序设计语言有了很大发展，简介如下。

1. 通用机器人语言

通用机器人语言（Generic Robot Language, GRL）：该语言是一种用于编写大型模块化控制系统的函数程序设计语言。正如在行为语言中一样，GRL 采用有限状态机作为它的基本建造模块。在此之上，它比行为模型提供了范围更广的结构用于定义通信流，以及不同模块之间的同步约束。用 GRL 写的程序可以被编译成高效的指令语言，如 C 语言。

2. 反应式行动规划系统

反应式行动规划系统（Reactive Action Planning System, RAPS）：该语言是一种用于并发机器人软件的重要程序设计语言，它使程序员能够对目标、与这些目标相关的规划（或不完全策略）和那些有可能使规划成功的条件进行指定。重要的是，RAPS 还提供了一些措施用于处理那些在实际机器人系统中不可避免发生的失败。程序员可以指定检测各种失败的例程序，并为每一种失败提供处理异常的过程。在三层体系结构中，RAPS 通常用在执行层，处理那些不需要重新进行规划的偶发事件。

3. GOLOG 语言

GOLOG 语言：该语言是一种将思考式问题求解（规划）和反应式控制的直接确定进行无缝结合的程序设计语言。用 GOLOG 写的程序通过情景演算进行形式化表示，并使用了非确定性的行动算子的附加选项。除了用可能的非确定性行动制定控制程序

以外，程序员还必须提供机器人及其环境的完整模型。一旦控制程序到达一个非确定性的选择点，一个规划器（具有理论证明机的形式）就被触发，用来决定下一步该做什么。这样，程序员就能够指定部分控制器，并依靠内置的规划器来做出最终的控制选择。

GOLOG 的优美性体现在它对反应和思考的无缝整合上。尽管 GOLOG 需要很强的条件（完全可观察性、离散的状态、完整的模型），但它已经为一系列室内移动机器人提供了高级控制。

4. 嵌入式系统 C++语言

嵌入式系统 C++语言（C for Embedded System, CES）：该语言是 C++语言的一种扩展，它集成了概率与学习。CES 数据类型为概率分布，允许程序员对不确定信息进行计算，而不必耗费实现概率技术通常所需的努力。更为重要的是，CES 使得根据实例训练机器人软件成为可能。CES 使程序员能够在代码中留出“缝隙”，由学习函数（典型的是诸如神经网络这样的可微分参数化表示方法）进行填补。然后这些函数再通过明确的训练阶段来归纳地学习，训练者必须指定所期望的输出行为。CES 已被证实能够在部分可观察的和连续的领域内很好地工作。

5. ALisp 语言

ALisp 语言：该语言是 Lisp 的一种扩展。ALisp 允许程序员指定非确定性的选择点，这与 GOLOG 中的选择点类似。不过，ALisp 通过强化学习来归纳地学习正确的行动，而不是依靠定理证明机进行决策。因此，ALisp 可以看作用来将领域知识尤其是关于所期望行为的分层“子程序”结构的知识，结合到强化学习机中的一种灵活手段。

到目前为止，ALisp 只在仿真中被用于机器人的学习问题，不过它为建造通过与环境交互进行学习的机器人提供了一套非常有前途的方法。

四、机器人仿真平台

构建机器人需要涉及很多学科的技能，包括嵌入式固件和硬件设计、传感器的选择、控制系统的设计及机械结构设计。仿真环境可以为测试、评测和机器人技术算法的可视化提供一个虚拟的舞台，而不用花费高昂的开发成本和时间。下面介绍几种比较常用的仿真平台。