

1.1 工业机器人简介

1.1.1 工业机器人的定义

人类长期以来的愿望是创造出一种能够像人一样执行各种工作的机器或“人造人”，以替代人类从事多种工作，这成为“机器人”概念的思想基础。1920 年，捷克作家卡雷尔·凯佩克(Karel Capek)发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》。在该剧本中，凯佩克将捷克语中表示“奴隶”的词汇“Robota”写作了“Robot”。当时，这部剧引起了广泛关注，并被认为是“机器人”一词的来源。

由于机器人一词带有“人”字，再加上科幻小说和影视作品的宣传，人们往往把机器人想象成外貌像人的机电装置。但事实并非如此，特别是工业机器人，其外貌与人并无相像之处。在国家标准《机器人与机器人装备词汇》(GB/T 12643—2013)中，工业机器人被定义为：“一种能自动定位控制、可重复编程的、多功能的、多自由度的操作机。它能搬运材料、零件或操持工具，用以完成各种作业。”操作机(manipulator)，又称执行机构，是机器人完成任务的机械实体，其具有类似于人手臂的动作功能，可以在空间抓取、释放物体或进行其他操作。工业机器人是一个复杂的机电系统，其中执行机构是机器人的机械主体，负责完成各种任务。它与电子器件密切相关，其灵活性和动态性能直接影响机器人系统的工作质量。本书的目的在于阐述工业机器人执行机构的设计方法，旨在为从事工业机器人设计和应用的专业人员提供有益的信息。

1.1.2 工业机器人的发展

1954 年，美国人 George C. Devol 提出了一个关于工业机器人的技术方案，随后被注册成为专利。1960 年，美国 Unimation 公司推出了工业机器人的实验样机。并于 1961 年推出了第一台名为“尤尼梅特”(Unimate, 见图 1-1)的工业机器人，用于模铸生产。与此同时，美国 AMF 公司也推出了一台名为“Versatran”的数控自动通用机电装置，并以“Industrial Robot”作为商品广告投入市场。随后，工业机器人在美国工业生产中得到了大力发展和广泛应用。

自 1967 年起，日本的丰田、川崎、安川及发那科等公司开始引进或自主开发工业机器人

技术。到 20 世纪 80 年代,工业机器人在日本工业中得到了广泛应用。如今,日本在机器人数量和制造技术方面都居于世界领先地位。截至 2021 年 2 月,安川公司的 MOTOMAN 系列机器人累计生产数量已达到 50 万台。该公司还建立了由机器人主导的自动装配、测试生产线,为机器人技术的进步作出了贡献。其他国家,如瑞典、德国、意大利等,也在积极推动工业机器人的研究和生产,这些国家拥有各自著名的工业机器人品牌,为全球机器人技术的发展作出了贡献。



图 1-1 Unimate 工业机器人(在 General Motors 工厂的模铸机上使用)

机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”,其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。我国的机器人技术起步较晚,但经过“七五”“九五”攻关计划和“863”计划,已经取得了较大进展。目前,国内工业机器人市场已经成熟,应用上遍布各行各业,机器人产业规模快速增长,2020 年机器人产业营业收入首次突破 1000 亿元,机器人产业蓬勃发展,正极大地改变着人类的生产和生活方式,为经济社会发展注入了强劲动能。为进一步推进机器人产业向中高端迈进,2021 年由工业和信息化部等 15 个部门起草发布了《“十四五”机器人产业规划》提出到 2025 年中国成为全球机器人技术创新策源地、高端制造集聚地和集成应用新高地,机器人产业营业收入年均增长超过 20%,制造业机器人密度实现翻番。



图 1-2 FANUC 发那科示教器

从技术发展历程来看,工业机器人经历了三个不同的发展时期:

目前大多数工业机器人仍使用 George C. Devol 提出的示教/再现(teach-in/playback)控制方案。该方案的最初形式是:人们用手抓住机器人的“手”,缓慢地进行“示教”,同时检测并储存决定“手”的位置、姿态等运动数据。工作时,再把这些储存的数据作为命令指挥机器人复现已经进行过的示教动作。由于手把手示教比较繁重,目前更多的是采用示教盒进行示教。示教盒是一个如图 1-2 所示的小型操作按钮“盘”,利用不同按钮可手动慢速操作机器人进行工作并储存所需要的数据,从而完成示教要求。人们将这种以示教/再现方式进行工作而没有感知功能(如力感觉、视觉、听觉等)的机器人称为第一代工业机器人。

随着科学技术的发展,出现了带视觉感知、触觉感知、听觉感知等感知功能的机器人,即第二代机器人。

第三代机器人是人们正在研制的智能化机器人,它不仅具有更发达的感知功能,还具有逻辑判断和决策功能,可根据作业要求和环境信息,自行工作。

1.2 工业机器人的组成

工业机器人通常由执行机构、驱动-传动系统、控制系统和智能系统四部分组成,如图 1-3 所示。这些部分之间的相互作用可用图 1-4 所示的方框图表示。

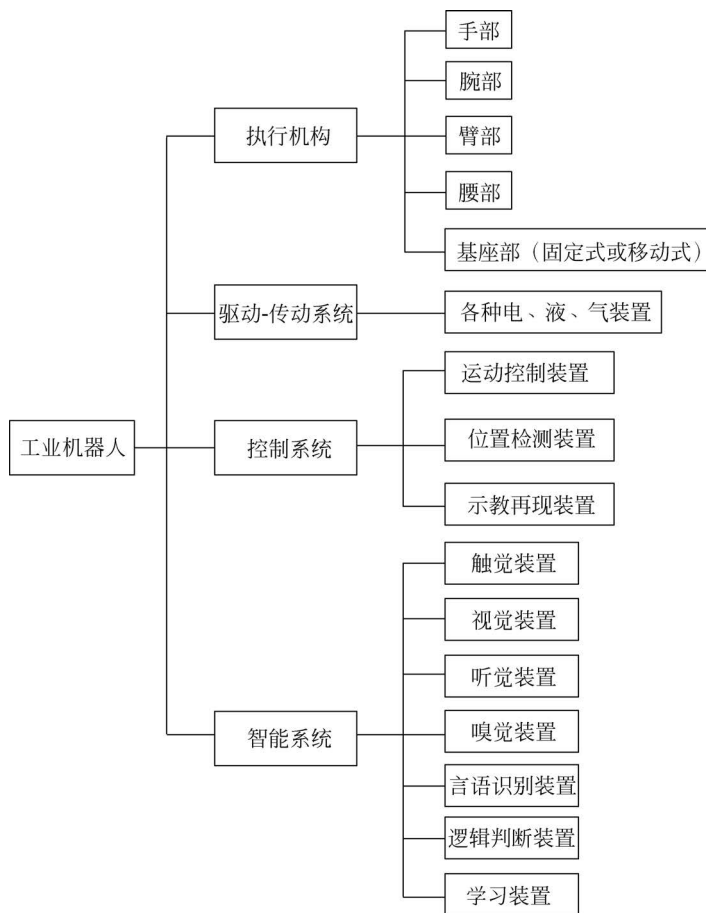


图 1-3 机器人的组成

1.2.1 执行机构

执行机构是机器人赖以完成工作任务的实体,通常由连杆和关节组成。如图 1-5 所示,从功能的角度,执行机构可分为:手部、腕部、臂部、腰部和基座部等。

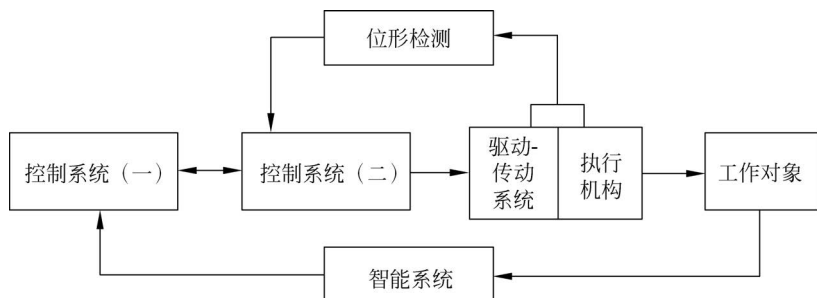
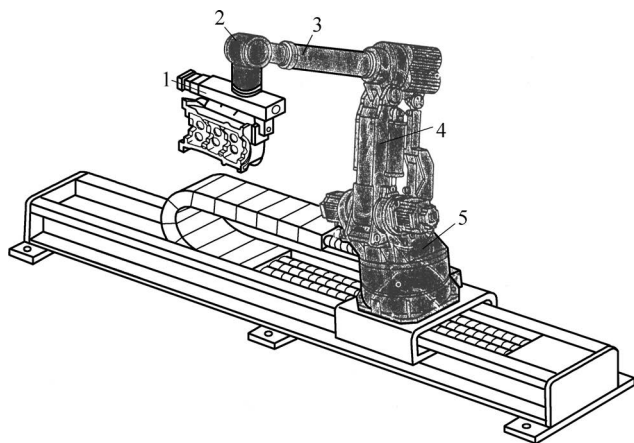


图 1-4 工业机器人各组成部分之间的关系



1—手部；2—腕部；3—臂部；4—腰部；5—基座部。

图 1-5 执行机构

(1) 手部。手部又称末端执行器,是工业机器人直接进行工作的部分,可以是各种夹持器。有时人们也常把诸如电焊枪、油漆喷头等划归为机器人的手部。

(2) 腕部。腕部与手部相连,通常有 3 个自由度,多为轮系结构,主要功用是带动手部完成预定姿态,是执行机构中结构最为复杂的部分。

(3) 臂部。臂部用以连接腰部和腕部,通常由小臂和大臂两个臂组成,用以带动腕部做平面运动。

(4) 腰部。腰部在机器人中充当着连接臂和基座的要件,通常为回转部件。通过腰部的回转运动,再结合臂部的平面运动,机器人的腕部可以在空间灵活运动。腰部作为执行机构的关键组成部分,其制造误差、运动精度及平稳性直接影响着机器人的定位精度。

(5) 基座部。基座是整个机器人的支撑部分,有固定式和移动式两种。该部件必须具有足够的刚度和稳定性。

1.2.2 驱动-传动系统

工业机器人的驱动-传动系统包括传动机构和驱动器两部分,它们通常与执行机构连成一体。传动机构常用的有谐波减速器、滚珠丝杠、链、带及各种齿轮轮系。驱动器通常有电动机、液动和气动装置,电动机又可以分为直流(direct current, DC)伺服电动机、步进电动机和

交流(alternating current, AC)伺服电动机,目前驱动器中使用最多的是 AC 伺服电动机。

1.2.3 控制系统

控制系统一般由控制计算机和伺服控制器组成。前者发出指令协调各关节驱动器之间的运动,同时还要完成编程、示教/再现及其他环境状况(传感器信息)、工艺要求、外部相关设备(如电焊机)之间的信息传递和协调工作。后者控制各关节驱动器,使各件按一定的速度、加速度和位置要求进行运动。图 1-6 所示是 PUMA 机器人的控制系统框图,该系统由 n 台数字伺服控制系统和一台控制计算机组成,每台数字伺服控制系统由一台单片机控制。

图 1-7 所示是 MOTOMAN 机器人的控制系统 YASNAC-ERC,该系统由 HIB 和 TIB 两部分组成。HIB 是人机接口部分,有一个用于人机交换信息的 CPU,还有显示器、示教盒、键盘,既可与个人计算机连接,又可与车间控制计算机联网。TIB 是轨迹控制部分,有一个用于运动控制的 CPU,可根据不同机种进行轨迹规划,该部分可与工作中的各种传感器(如摄像机)相连,有 I/O 控制接口,可用于控制机器人 6 个运动轴的伺服控制器,同时当机器人工作时也可以控制周边设备 2×3 个运动轴的数字伺服控制器。HIB 和 TIB 之间有双向存储器,用以交换信息,存储数据。图 1-8 所示是 TIB 部分的数字伺服系统框图,像 PUMA 一样,每台伺服系统也是由一台单片机组成的三闭环位控系统,采用了软件伺服、AC 伺服电动机和绝对式光码盘。

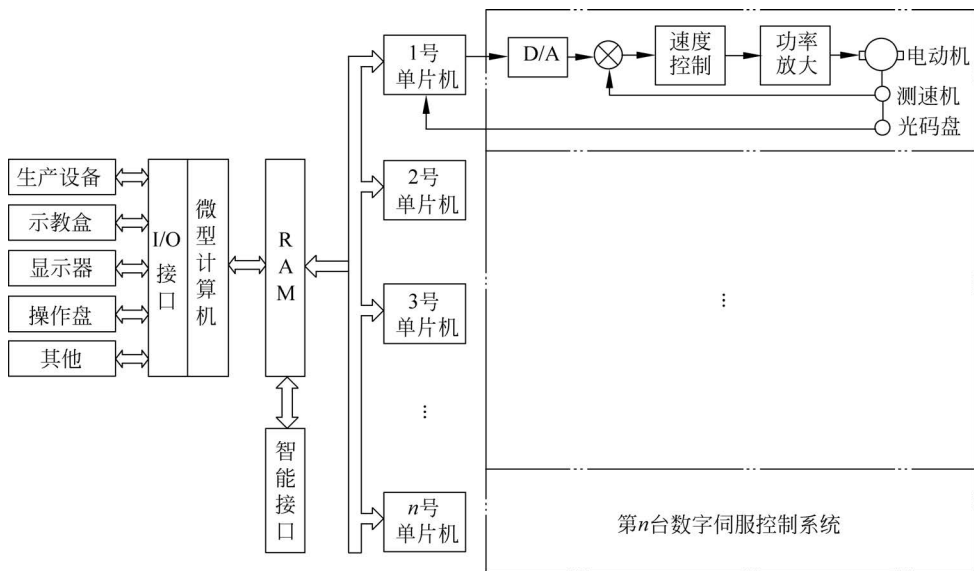


图 1-6 PUMA 机器人的控制系统

1.2.4 智能系统

智能系统是目前机器人系统中一个不够完善但发展很快的子系统,它可分为感知系统和分析-决策智能系统两部分,前者主要靠硬件(各类传感器)实现,后者主要靠软件(如专家

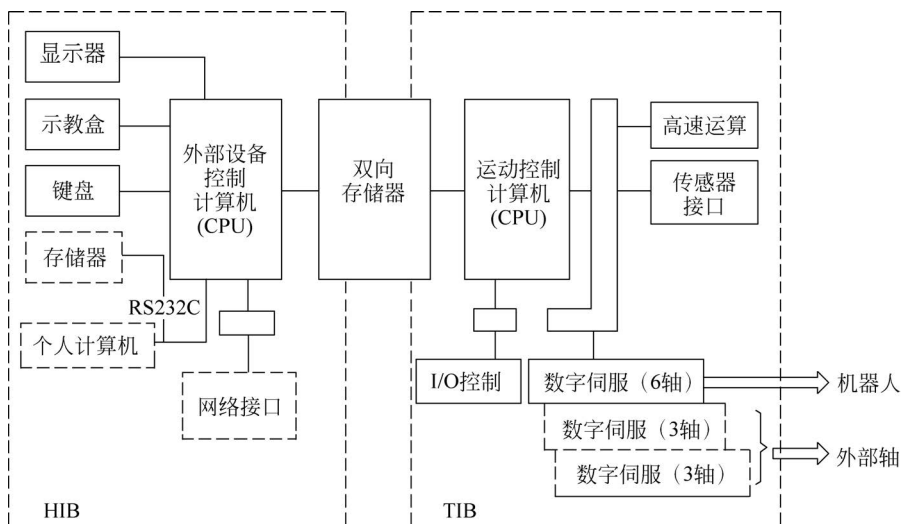
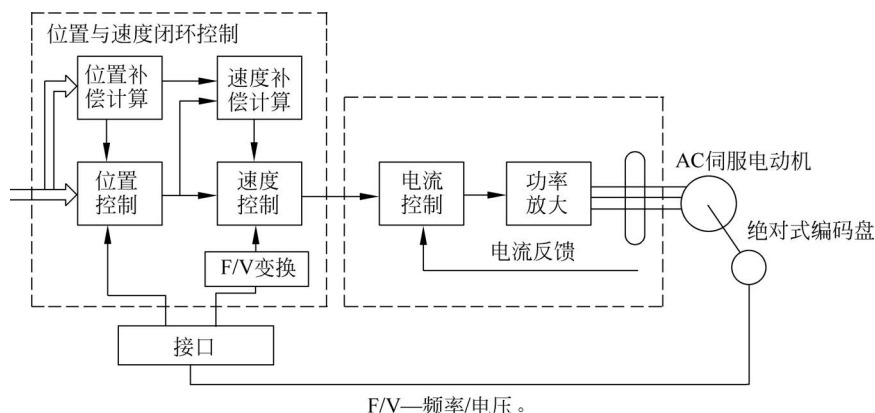


图 1-7 MOTOMAN 机器人控制系统



F/V—频率/电压。

图 1-8 YASNAC-ERC 的数字伺服系统

系统)实现。现有的机器人智能控制方法主要依赖感知系统获取外部环境信息和自身状态信息,随后由分析决策系统对获得的数据进行深入处理,最终生成精确的控制指令。以图 1-9 所示的六维力感知传感器为例,它可装于机器人的手部,以感知手部 3 个方向的力和 3 个方向的力矩。在装配作业中,这种力感知是很重要的信息,机器人的控制系统可以根据这一组力感知,调整手部位姿,以顺利完成装配作业。在弧焊机器人系统中已运用了基于激光视觉检测的焊缝跟踪系统,用以感知焊丝与焊缝之间的偏差,当偏差超过一定值时,控制系统便会自动调整焊丝的位置,使焊接能够顺利地进行。

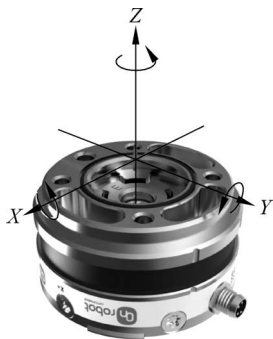


图 1-9 六维力感知传感器 HEX

对于决策控制系统而言,针对不同的机器人任务场景,已经涌现出多种智能决策方法,代表性的有专家系统、监督学习、强化学习和模型预测控制等方法。

在具备充分先验决策参考信息的情况下,专家系统和知识图谱等方法表现出卓越性能。如图 1-10 所示,基于规划的机器人规划专家系统由知识库、推理机和控制策略三部分组成。知识库用于存储某些特定领域的专家知识和经验,包括机器人工作环境的世界模型、初始状态、物体描述等事实和可行操作或规则等;推理机用于记忆所采用的规则、控制策略及推理策略,根据知识库的信息,推理机能够使整个机器人规划系统以逻辑方式协调地工作,进行推理并做出决策,找到理想的机器人操作序列;控制策略包含综合机制,确定系统应当采用何种规则及采取何种方式寻找该规则,具体实施机制包括搜索、匹配和回溯等环节。

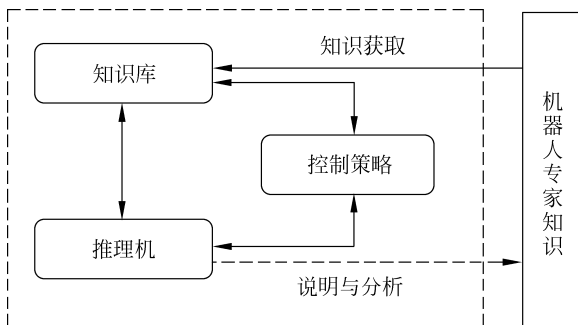


图 1-10 基于专家系统的机器人决策机制

基于监督学习的机器人端到端决策控制方法(见图 1-11)依赖大量标注好的训练数据,在数据充足的前提下表现出较好的决策和控制效果。这种方法的基本思路是利用机器人在不同情境下的输入和相应的期望输出(或者行为),使机器人学习并模仿高质量的样本决策,使得模型输出与样本数据的误差尽可能小。该方法的应用主要包括数据收集、数据预处理、模型选择、训练模型、模型评估、调优和改进、部署和应用等环节。

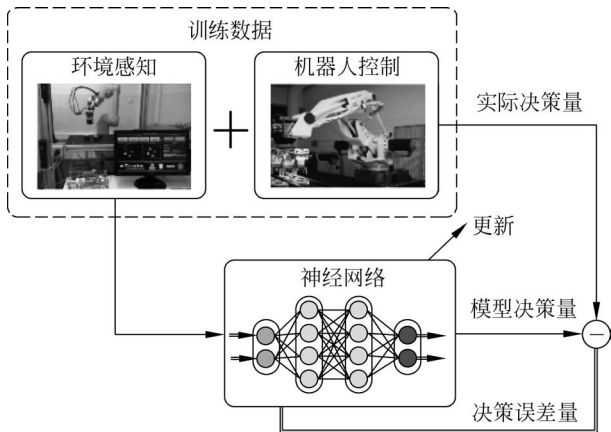


图 1-11 基于监督学习的机器人决策控制框架

依托深度神经网络的监督学习又被称为深度学习。目前常用的深度学习网络结构包括多层感知器(multi-layer perceptron,MLP)、卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)、循环神经网络(recurrent neural network,RNN)、长短时记忆网络(long short-term memory networks,LSTM)和 Transformer 模型等。其中,MLP 的优势是能够处理复杂的非线性关系,具有强大的拟合能力,适用于多种数据类型。此外,MLP 的结构相对简单,易

于理解和实现。CNN 主要用于图像处理任务,其特点是通过卷积层有效提取图像中的特征,具有平移不变性,适用于图像分类、物体检测等领域。RNN 和 LSTM 适用于序列数据,能够处理时序信息,但存在梯度消失和爆炸问题。Transformer 则通过自注意力机制解决了这些问题,广泛用于自然语言处理任务,如机器翻译、文本生成等。针对机器人决策的不同任务,如场景辨识、机构控制、指令理解和任务解构等,需要针对性地选择不同的网络结构实现不同的功能。

相较于监督学习,强化学习(reinforcement learning, RL)是一类拟人的决策控制方法,不依赖带有标签的机器人决策数据(见图 1-12)。这种方法利用收益函数(reward)作为激励,采用探索试错的方式自主学习决策网络,以最大化累积回报。这使得强化学习特别适用于现有数据量少的机器人控制任务。目前主流的强化学习算法包括 distributional soft actor-critic(DSAC)、soft actor-critic(SAC)、proximal policy optimization(PPO)等,代表性的强化学习求解工具链有 GOPS(general optimal control problem solver)等。

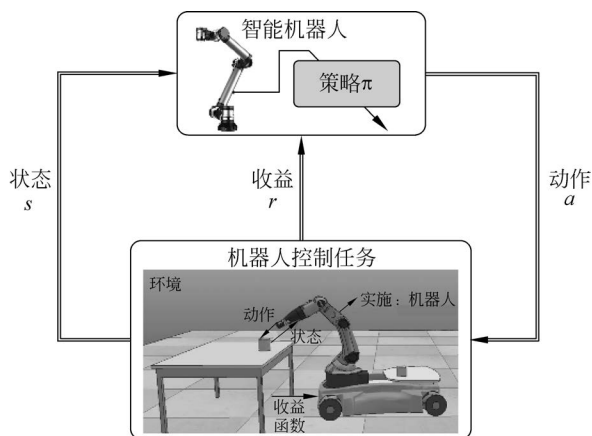


图 1-12 基于强化学习的机器人决策控制框架

如图 1-13 所示,基于模型预测控制方法(model predictive control, MPC)的机器人决策控制通过结合预测、优化和实时反馈,使机器人能够在复杂和动态环境中做出智能决策,这

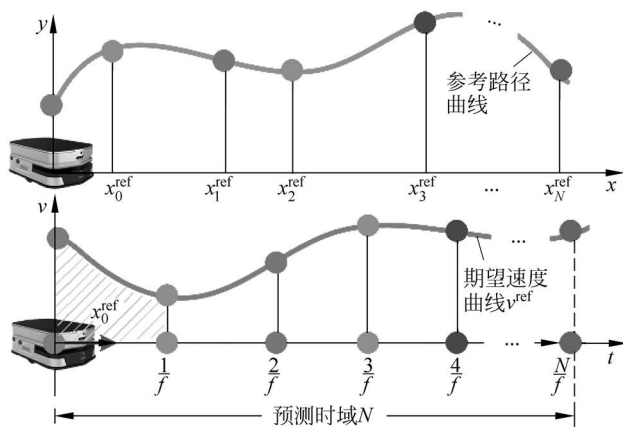


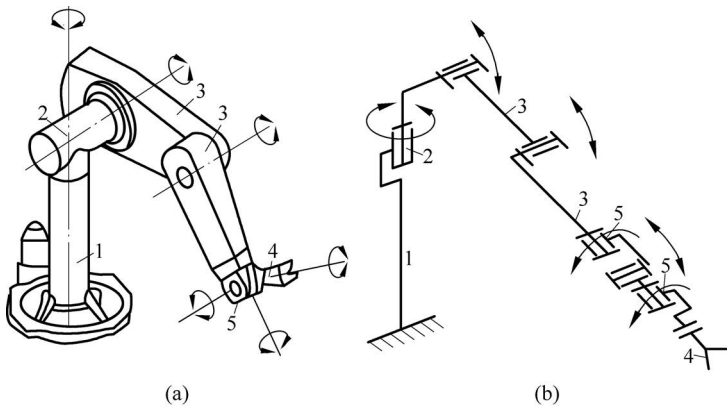
图 1-13 基于 MPC 的机器人决策控制框架

种方法在需要高度系统稳定性而实时性要求相对较低的场景中有极为优异的表现。MPC 通过在每个时间步骤上求解优化问题来确定控制输入,以实现系统的最佳性能。为了求解这些优化问题,需要使用专门的求解器。常用的 MPC 求解器有 IPOPT 和 qpOASES 等。

此外,在人机协同控制场景下,借助大模型进行任务分解和推理决策也已成为一种切实可行的选择。这些方法各自具备独特的优势,能够根据不同的应用场景提供最佳决策,实现机器人的智能控制,而先进的决策方法进一步提升了机器人系统的场景自适应能力和任务功能泛化能力。

1.3 工业机器人的主要结构类型

机器人属于一类空间机构,由于结构上的原因,运动副通常只用转动副和移动副两类。其中,用转动副相连的关节称作转动关节(记作 R),与移动副相连的则称为移动关节(记作 P)。这些关节之中,凡单独驱动的称为主动关节,反之称为从动关节。单独驱动的主动关节数目称作工业机器人的自由度^①数目。通常,运动链的自由度和手部运动的自由度在数量上是相等的,图 1-14 所示的 PUMA 工业机器人属于 6 自由度开链串联型,大体可分为基座部、腰部、臂部(大臂和小臂)和手腕 4 部分。前 3 个关节(由基座算起)具有 3 个转动自由度,功用是确定手部在空间的位置,所以这 3 个关节和连接它们的臂杆所构成的机构被称作机器人的位置机构。后 3 个关节的主要功用是确定手部在空间的姿态,即手部固联坐标系相对于参考坐标系的方向,所以这 3 个关节和连接它们的连杆所构成的机构被称作姿态机构。位置机构可基本确定机器人的空间工作范围,所以前 3 个关节的运动通常称作机器人的主运动。机器人可根据前 3 个关节的不同运动组合形式进行分类。



1—基座部; 2—腰部; 3—臂部; 4—手部; 5—腕部。

图 1-14 PUMA 机器人

(a) 立体图; (b) 机构简图

^① 自由度在机器人机构学领域更普遍的理解应为: 确定机械系统位形或位姿所需要的独立变量或广义坐标数, 一个刚体最多具有 6 个自由度。主动关节数定义为活动度数更为合适。目前工程与许多教材、文献中仍有大量将驱动数目定义为自由度数目的案例, 阅读时需注意区分, 下面不再赘述。

根据机器人位置机构的结构类型可将机器人分为直角坐标型机器人、圆柱坐标型机器人、球坐标型机器人、关节型机器人和并联机器人等。

1.3.1 直角坐标型机器人

直角坐标型机器人通过 3 个互相垂直的轴线位移来改变手部的空间位置。其前 3 个关节为移动关节(PPP),运动形式如图 1-15 所示。该类机器人易于实现高定位精度,空间轨迹易于求解,但当具有相同的工作空间时,机体所占空间体积较大。

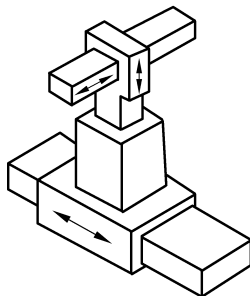


图 1-15 直角坐标型机器人

1.3.2 圆柱坐标型机器人

圆柱坐标型机器人通过 2 个移动和 1 个转动(PPR)来实现手部的空间位置变化,如图 1-16 所示。图 1-17 所示的 Versatran 机器人就是一种圆柱坐标型机器人。在相同的工作空间条件下,该机器人机体所占空间体积小于直角坐标型机器人。其结构简单,便于几何计算,通常用于搬运机器人。

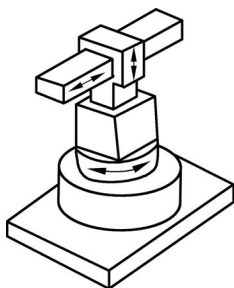


图 1-16 圆柱坐标型机器人

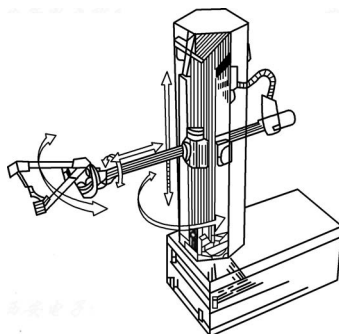


图 1-17 Versatran 机器人

(图片来源: 工业机器人的发展 自动控制网(cadianqi.com))

1.3.3 球坐标型机器人

球坐标型机器人用 2 个转动和 1 个移动(RRP)来改变手部的空间位置。一般是腰关节可绕 z 轴转动,大臂可在 $z-x$ 平面内俯仰(转动),小臂可伸缩移动,如图 1-18 所示。著名的 Unimate 机器人(见图 1-1)就是这种类型的机器人。这种机器人的特点是结构紧凑,所占空间体积小,但目前应用较少。

1.3.4 关节型机器人

关节型机器人通过模拟人的上臂进行工作。它的前 3 个关节是转动关节(RRR),腰关