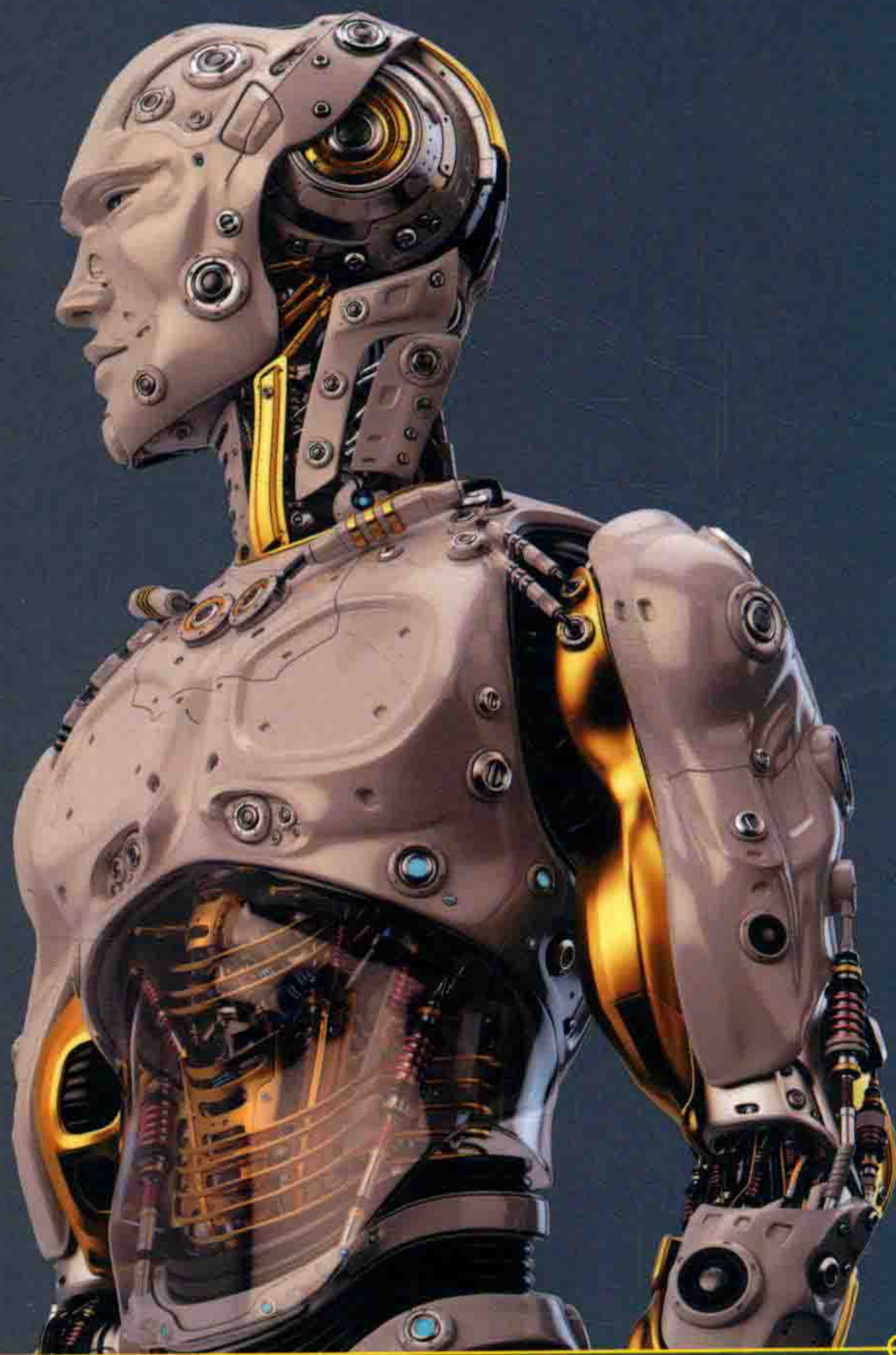


机器人操作系统 ROS原理与应用

ROS PRINCIPLE
AND APPLICATION

周兴社 杨刚 王岚 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

机器人操作系统 ROS原理与应用

ROS PRINCIPLE
AND APPLICATION

周兴社 杨刚 王岚 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人操作系统 ROS 原理与应用 / 周兴社等编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.5

ISBN 978-7-111-56836-0

I. 机… II. 周… III. 机器人—操作系统—程序设计 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 103675 号

机器人操作系统 ROS 原理与应用

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余 洁

责任校对: 殷 虹

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 13.5

书 号: ISBN 978-7-111-56836-0

定 价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有 • 侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

近年来,随着机电一体化、嵌入式系统及人工智能等科学技术的快速发展,智能机器人的研究与应用在全球范围内方兴未艾。在世界主要科技强国近年陆续出台的科技与产业发展规划中,工业、农业、服务、特种等各类智能机器人均作为核心技术受到了前所未有的重视,智能机器人应用已经成为衡量一个国家工业化和信息化发展水平的重要标志。

智能机器人具备的自主感知、运动规划、动作控制和协同活动等能力不仅取决于智能机器人所配置的硬件平台,也与其软件系统功能和性能密切相关。机器人操作系统是各类智能机器人的基础性运行与开发软件平台,其在屏蔽智能机器人异构硬件资源的基础上,支撑实现了智能机器人运行控制与管理,以及应用软件的开发,是构成各类智能机器人控制和任务软件系统的重要组成部分。

作为开放源码的机器人运行支撑软件和开发工具集,机器人操作系统 ROS (Robot Operating System) 不仅具有智能机器人的环境感知、运动控制、操作管理及多机协同等运行支撑功能,而且可以支持智能机器人应用软件和系统的功能验证、环境仿真及可视演示等高效开发活动。由于 ROS 具有分布式架构、多语言支持、易于扩展、持续发展等特点,其已成为各类智能机器人运行与开发的主流通用软件平台。本书主要分析 ROS 的核心功能实现原理,探讨基于 ROS 的智能机器人软件系统优化开发方法与实现技术,旨在为相关专业的本科生和研究生学习提供原理性教材,并为从事智能机器人技术研发、系统集成及领域应用的技术人员提供专业化的技术参考。

本书共分为 10 章,由周兴社统编和审核;杨刚负责第 1 和第 10 章的编写以及部分章节的完善;王岚参编了第 2、3、7 章,并整理了各章的图表;曾闹闹参编了第 4、8 章;张森参编了第 5、9 章;刘添福参编了第 6 章和第 10 章的部分内容;袁艺文参编了第 5 章的部分内容;闫小成参编了第 6 章的部分内容。在此,主编对各位参编者的贡献表示感谢,并感谢机械工业出版社编辑的辛勤工作。

我国在《经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中将智能机器人定位为战略性新兴产业,并提出大力发展工业机器人、服务机器人、手术机器人和军用机器人,推动人工智能技术应用;“国家创新驱动战略”将“智能制造与机器人”列为国家重大专项;《中国制造 2025》将智能机器人列为核心技术。相信在未来十年,乃至更长的时间内,我国智能机器人技术与产业必将获得快速发展,智能机器人领域应用将会出现百花齐放的局面,从而促进工业进步,满足特种需求,服务人民生活。本书若能为此尽些绵薄之力,我们将会倍感欣慰。

目 录

前言

第 1 章 智能机器人及其发展概述 ··· 1

1.1 智能机器人概念及其特点 ··· 1
1.1.1 智能机器人概念 ··· 1
1.1.2 智能机器人的发展 ··· 2
1.1.3 智能机器人的特点 ··· 3
1.2 智能机器人的组成 ··· 3
1.2.1 智能机器人的硬件组成 ··· 3
1.2.2 智能机器人的软件系统 ··· 7
1.3 智能机器人的分类 ··· 10
1.3.1 服务智能机器人 ··· 11
1.3.2 工业智能机器人 ··· 14

第 2 章 ROS 体系架构 ··· 18

2.1 ROS 框架 ··· 18
2.1.1 ROS 简介 ··· 18
2.1.2 ROS 整体架构分析 ··· 20
2.1.3 名称系统 ··· 27
2.2 ROS 2.0 框架 ··· 28
2.2.1 ROS 2.0 简介 ··· 28
2.2.2 ROS 与 ROS 2.0 之间的 主要区别 ··· 29
2.3 本章小结 ··· 31

第 3 章 ROS 通信机制 ··· 32

3.1 ROS 通信机制概述 ··· 32
3.1.1 ROS 通信机制概念 ··· 32
3.1.2 ROS 通信机制的基本要素 ··· 32
3.1.3 ROS 通信机制的分类 ··· 33
3.2 基于主题的异步数据流通信 ··· 33
3.2.1 简介 ··· 33
3.2.2 异步数据流的实现基础 ··· 34
3.2.3 异步数据流的实现过程 ··· 42

3.2.4 回调函数处理 ··· 47
3.3 基于服务的同步 RPC 通信 ··· 50
3.3.1 简介 ··· 50
3.3.2 同步 RPC 通信的实现过程 ··· 51
3.4 基于参数服务器的数据传递 ··· 55
3.4.1 简介 ··· 55
3.4.2 具体实现过程 ··· 57
3.5 本章小结 ··· 58

第 4 章 ROS 坐标变换体系及其实现 ··· 60

4.1 机器人运动学基本原理 ··· 60
4.1.1 空间坐标系的描述和转换 ··· 60
4.1.2 机器人的正运动学 ··· 65
4.2 ROS tf ··· 69
4.3 tf 原理分析 ··· 70
4.3.1 相关数据结构 ··· 70
4.3.2 tf 关键模块的实现 ··· 80
4.4 特定机器人的 ROS tf 应用实例 ··· 85
4.4.1 tf 外部接口 ··· 85
4.4.2 ROS tf 在 UR5 上的应用 ··· 85
4.5 本章小结 ··· 87

第 5 章 ROS 任务调度与有限状态机实现 ··· 88

5.1 ROS 任务调度接口设计 ··· 88
5.1.1 action 的设计与编译 ··· 88
5.1.2 基于主题的 ActionClient 与 ActionServer 的交互设计 ··· 89
5.1.3 ActionClient 与 ActionServer 的交互过程 ··· 90
5.1.4 action 状态变换 ··· 91
5.1.5 actionlib 的任务调度策略 ··· 93
5.1.6 actionlib 接口的具体实现 ··· 95

5.2 ROS 有限状态机的 SMACH	98	7.2 遗产代码的 ROS 集成	136
5.2.1 有限状态机的基本原理	98	7.2.1 ROSlink 简介	136
5.2.2 SMACH 概述	100	7.2.2 ROSlink 实现概述	137
5.2.3 SMACH 状态描述	102	7.2.3 ROSlink 设计原理	138
5.2.4 SMACH 容器设计与实现	107	7.3 机器人任务级编程	141
5.2.5 SMACH 主要处理 构件分析	111	7.3.1 简介	142
5.2.6 状态机的具体实现	113	7.3.2 功能可见性模板示例	142
5.3 本章小结	115	7.3.3 实现架构	143
7.3.4 Rviz 用户界面		7.3.4 Rviz 用户界面	144
第 6 章 ROS 运动规划及其实现	116	7.4 本章小结	146
6.1 智能机器人运动控制概述	116	第 8 章 基于 ROS 的服务智能 机器人设计	147
6.2 ROS MoveIt 包介绍	117	8.1 服务智能机器人的基本情况	147
6.2.1 用户接口	117	8.1.1 服务智能机器人的现状 及分类	147
6.2.2 ROS MoveIt 参数配置	118	8.1.2 服务智能机器人的 关键技术	148
6.2.3 ROS MoveIt 机器人接口	119	8.2 ROS 导航功能包集介绍	149
6.2.4 ROS MoveIt 运动规划 实现	120	8.2.1 概述	149
6.3 运动规划库	121	8.2.2 实现过程	151
6.3.1 运动规划库概述	121	8.3 基于 ROS 的服务智能机器人 设计案例	153
6.3.2 MoveIt 运动规划 编程用例	122	8.3.1 先锋 3DX 机器人——利用 ROS 实现建图、定位和 自主导航	153
6.3.3 规划接口定义	123	8.3.2 基于 ROS 的足球机器人 设计 (以 NAO 机器人 为例)	157
6.3.4 OMPL 接口分析	124	8.3.3 基于 ROS 的多机器人协作 AAL 体系架构	159
6.4 RRT 算法	125	8.3.4 基于 ROS 的助老服务 机器人设计	162
6.4.1 基本 RRT 算法描述	125	8.4 本章小结	167
6.4.2 RRT 算法的性能分析	127	第 9 章 基于 ROS 的工业智能 机器人设计	168
6.4.3 RRT 算法的几种优化	128	9.1 工业智能机器人及其软件 开发挑战	168
6.4.4 CRRT 算法	129		
6.5 本章小结	130		
第 7 章 基于 ROS 的智能机器人 系统开发方法	131		
7.1 ROS 实时化	131		
7.1.1 混合实时 ROS 体系结构 RGMP-ROS	131		
7.1.2 案例分析	133		
7.1.3 结合 OROCOS 的实时性 实现	135		

9.1.1	工业智能机器人	168	10.1.1	微软机器人软件平台	189
9.1.2	工业智能机器人软件开发 挑战	168	10.1.2	ABB 智能机器人软件 平台	190
9.2	ROS-Industrial	169	10.1.3	服务机器人软件体系 框架 SAFSR	193
9.2.1	ROS-Industrial 简介	169	10.2	智能机器人软件未来的发展 方向	194
9.2.2	ROS-Industrial 项目	169	10.2.1	多传感器信息融合	194
9.3	基于 ROS-Industrial 的工业 智能机器人开发实例	177	10.2.2	人机协作	195
9.3.1	基于 ROS-Industrial 的智能 喷涂机器人设计	177	10.2.3	人工智能深化应用	196
9.3.2	工业机械臂 Descartes 运动 规划	179	10.2.4	多机器人协作	197
9.3.3	特定工业机器人 MotoPlus- ROS 增量运动实现	181	10.3	云机器人软件平台	198
9.4	本章小结	188	10.3.1	云机器人发展背景	198
第 10 章	智能机器人软件平台及其 未来发展	189	10.3.2	云机器人系统结构与计算 模型	199
10.1	其他智能机器人软件平台	189	10.3.3	Rapyuta 机器人云平台	202
			10.3.4	云机器人面临的挑战	206
			参考文献		207

智能机器人及其发展概述

1.1 智能机器人概念及其特点

1.1.1 智能机器人概念

1954 年, 美国人乔治·德沃尔制造出了世界上第一台可编程的机器人; 1959 年, 德沃尔与美国发明家约瑟夫·英格伯格联手制造出了第一台工业机器人, 自此之后, 机器人大体经历了如下三个发展阶段。第一代机器人称为示教再现型机器人, 它是通过计算机控制一个多自由度的机械, 并通过示教存储程序和信息, 在工作时读取信息, 发出指令, 机器人就可以根据事先示教的结果, 再现出同样的动作, 如汽车点焊机器人只要对其示教点焊过程, 它就总是重复同样的操作, 不过因为其对于外界环境没有感知, 因而操作力大小、点焊质量等均无从知晓。第二代机器人称为带感觉的机器人, 通过为其配置各类传感器, 其具有一定程度的力觉、触觉、视觉等感觉能力, 如当搬运机器人抓住一样物体时, 它就能自动感觉出实际的用力大小, 并能通过视觉感受和识别出物体的形状、大小及其颜色。第三代机器人即智能机器人, 目标是只需要告诉它做什么, 而不用告诉它怎么做, 它就能完成感知、运动、推理和人机交互等功能和机能, 目前还只在局部有这种智能的概念和含义, 随着科学技术的不断发展, 智能的概念与内涵将会越来越丰富。

到目前为止, 在世界范围内还没有一个统一的智能机器人的定义。1956 年, 马文·明斯基提出了他对智能机器的理解: “智能机器能够创建周围环境的抽象模型, 一旦遇到问题, 便能够从抽象模型中寻找解决方法”。该定义对此后 30 年智能机器人的研究方向产生了重要影响。

还有一种理解是智能机器人是具备某些与生物类似的智能能力且具有高度灵活性的自动化机器。大多数专家认为智能机器人至少要具备以下三个要素: 一是感觉要素, 用来认知周围的环境状态; 二是运动要素, 用来对外界做出反应性动作; 三是思考要素, 根据感觉要素所得到的信息, 思考应采用什么样的动作。

国内科学家对机器人的定义是: “智能机器人是一种自动化的机器, 所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力。”在研究和开发作业于未知及不确定环境下的机器人的过程中, 人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技

术的结合,因此将具有感知、思考、决策和动作的技术系统统称为智能机器人,其是具有感知能力、规划能力、动作能力和协同能力的一种高度灵活性的自动化机器。

1.1.2 智能机器人的发展

1. 智能机器人的发展背景

机械的使用放大并延伸了人的四肢能力,计算机的使用提升了人脑的功能,而机器人的使用将大大拓展人类的综合能力。进入21世纪以来,智能机器人的研发和应用得以快速发展,其主要发展背景包含以下几个方面:

1) 制造业劳动力的价格越来越高,而产品的价格却越来越低,企业需要利用机器人改变传统制造业依赖密集型廉价劳动力的生产模式。

2) 人类寿命和生活质量越来越高,然而能够提供老龄化服务的人力资源却越来越少,因此需要利用智能化机器设备提供优质服务。

3) 自然灾害、人为灾害及战争仍在频繁发生,而人类难以适应此类环境,因此需要机器人代替人来执行任务。

4) 人类探索深海、太空等极端环境的活动越来越频繁,而人类在此类环境中的生存能力极低且代价很高,因此需要利用机器人实现远程交互作业。

2. 初级与高级智能机器人

智能机器人正在由初级阶段向高级阶段发展。初级智能机器人具有像人那样的感受、识别、推理和判断的能力,可以根据外界条件的变化,在一定范围内自行修改程序,也就是它能适应外界条件的变化并对自己进行相应的调整。不过,修改程序的原则将由人预先给以规定。这种初级智能机器人已拥有一定的智能水平,虽然还没有自动规划的能力,但这种初级智能机器人已走向成熟,达到了实用的水平。

高级智能机器人和初级智能机器人一样,具有感觉、识别、推理和判断的能力,同样可以根据外界条件的变化,在一定范围内自行修改程序。所不同的是,修改程序的原则不是由人预先规定的,而是机器人自己通过学习、总结经验来获得修改程序的原则,所以它的智能程度更高。这种机器人已拥有一定的自动规划能力,能够自己安排自己的工作。这种机器人可以不要人的照料,完全独立地工作,故称为高级自律机器人,这类机器人也开始走向实用。

3. 特种智能机器人

特种智能机器人具有较大的应用前景。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深,人们开发出了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种智能机器人,如水下机器人、空间机器人、空中机器人、地面机器人、微小型机器人等各种用途的机器人相继问世。对不同任务和特殊环境的自适应性,也是智能机器人与一般自动化装备的

重要区别。这些机器人从外观上已远远脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状,而是更加符合各种不同应用领域的特殊要求,其功能和智能程度也大大增强,从而为机器人技术开辟出更加广阔的发展空间。

将智能机器人的技术(如传感技术、智能技术、控制技术等)扩散和渗透到各个领域形成各式各样的新机器——机器人化机器。当前与信息技术的交互和融合又产生了“软件机器人”“网络机器人”等名称,这也说明了机器人所具有的创新活力。

1.1.3 智能机器人的特点

智能机器人的特点就是智能,其具体体现在以下几方面。

- 自主性:是指其可以在特定的环境中,不依赖任何外部控制,无需人为干预,完全自主地执行特定的任务。
- 适应性:是指它可以实时识别和测量周围的物体,根据环境的变化调节自身的参数,调整动作策略,以及处理紧急情况。
- 交互性:是指机器人可以与人、外部环境及与其他机器人之间进行信息交流。
- 学习性:是指机器人在自主感知环境变化的基础上,可以形成和进化出新的活动规则,自主独立地活动和处理问题。
- 协同性:是指在实时交互的基础上,机器人可以依据需求和任务实现机机协作和人机协同。

智能机器人技术是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术,是当代研究十分活跃,应用日益广泛的领域。智能机器人应用是衡量一个国家工业化和信息化发展水平的重要标志。

1.2 智能机器人的组成

1.2.1 智能机器人的硬件组成

智能机器人所具备的感知、规划、动作和协同等能力确定了其硬件的组成与结构。为了感知和识别对象和环境,其需要丰富的内部传感器和外部传感器;为了作用于对象并影响周围环境,其需要多种能力的动作执行器;智能机器人的核心是一个相当发达的“大脑”——控制计算机,其用于实现机器人的实时管控和智能处理;智能机器人具有人机协同、多机器人协作等能力,因此需要配置多样化交互接口和网络通信接口。综上所述其硬件组成如图 1-1 所示。

(1) 内部传感器组

完成机器人自身位置、速度、力度等实时测量和感知,为实现伺服控制提供依据。

- 位置(位移)传感器:感知机器人当前位置和位移状态,其又可分为直线移动传

传感器和角位移传感器；例如，实现角位移感知的光电编码器能够得到对应于编码器初始锁定位置的驱动轴瞬时角度值。当设备感受到压力时，只要读出每个关节编码器的读数，就能及时调整伺服控制的给定值，以防止机器人启动时产生过于剧烈的运动。

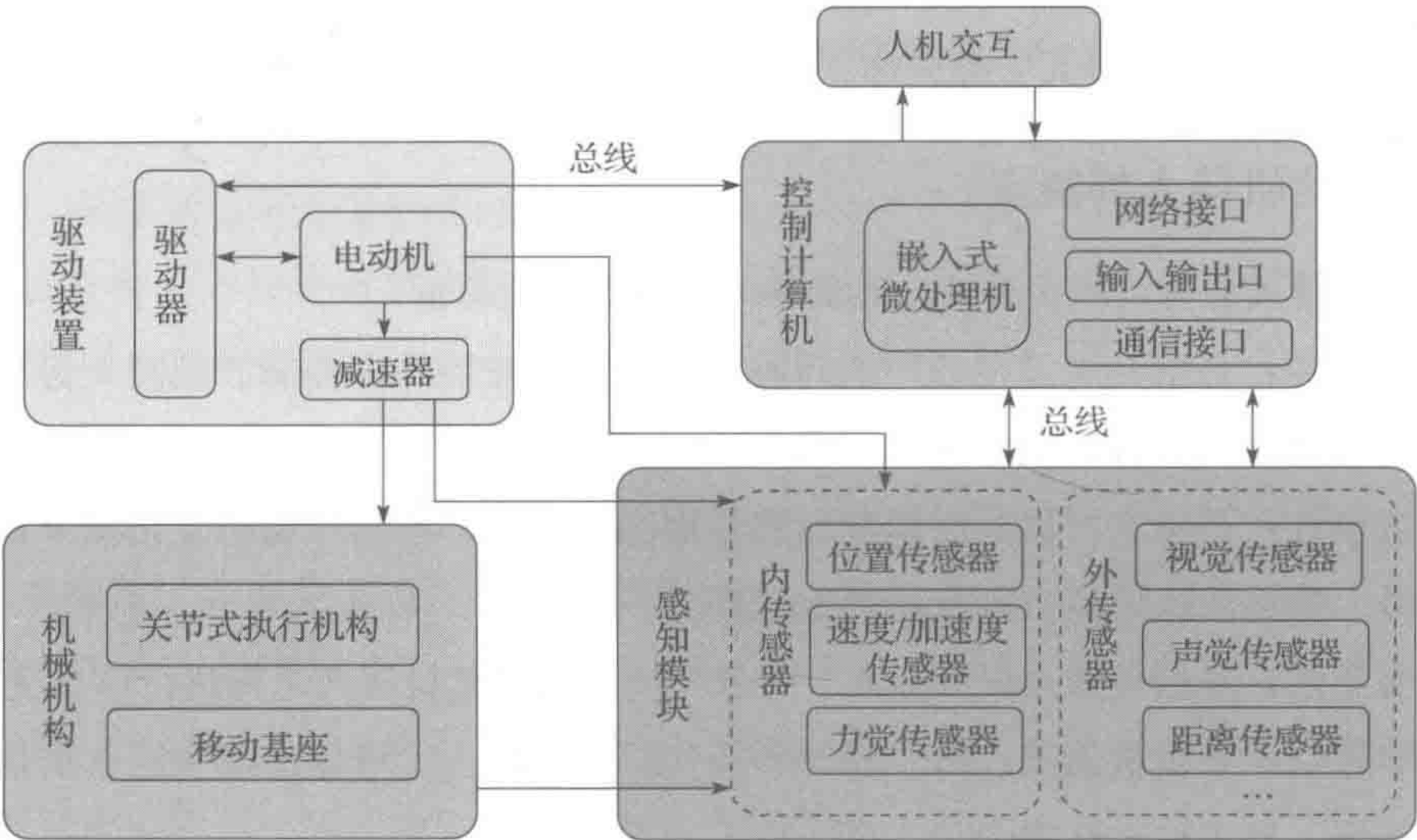


图 1-1 智能机器人的硬件组成与基本结构

- 速度和加速度传感器：主要用于感知旋转运动的速度，常用光电脉冲式转速传感器来实现；加速度传感器可用于测量机器人的动态控制信号，一般由速度测量进行推演。主流的传感器有应力传感器和振动式加速度传感器。
- 力觉传感器：主要用于测量两个物体之间的作用力分量和力矩分量。主要有半导体型力觉传感器、转矩传感器及基于弦振动原理的力觉传感器等。例如，斯坦福研究所研制的光腕力传感器是由 6 个小型差动变压器组成的，能够测量作用于腕部 X、Y 和 Z 三个方向的动力及各轴动转矩。

(2) 外部传感器组

通过视觉、触觉及听觉等的感知，实现智能机器人及时反映环境变化、自主调整自身行为的能力。

- 视觉传感器：机器视觉已成为智能机器人的主要感知手段，微型化智能数字摄像机是其主要选择。
- 触觉传感器：用于感知动作执行器与对象的接触及其程度；微型开关是触觉传感器的常用选择，隔离式双态接触传感器、矩阵传感器、光反射触觉传感器等也是新发展的触觉传感器。
- 听觉传感器：用于感受和解释气体（非接触感受）、液体或固体（接触感受）中的

声波。声波传感器可以从简单的声波存在检测到复杂的声波频率分析,直到对连续自然语言中单独语音和词汇的辨别。

- 滑觉传感器:用于检测物体的滑动。当要求智能机器人抓住特性未知的物体时,必须确定最适当的握力值,所以要事先检测出握力不够时所产生的物体滑动信号。目前已有基于光学和利用晶体接收器等不同原理的滑觉传感器,后者的检测灵敏度与滑动方向无关。
- 其他外传感器:用于智能移动机器人的距离感知的激光测距仪、声呐传感器等距离传感器;用于感知环境温度的接触式或非接触式温度传感器;用于检测物体的存在和测量距离的超声波接近度传感器等。

(3) 驱动与作动器

驱动与作动器是驱动智能机器人活动的动力机构。驱动器可将电能、液压能和气压能转化为机器人的动力,并驱动自身移动或机械臂关节的移动。

- 驱动电动机是智能机器人的基本驱动器:机器人驱动器的本质问题是控制电动机,控制电动机的转数就可以控制机器人移动的距离和方向、机械臂的弯曲度或移动距离等,驱动电动机主要有步进电动机和伺服电动机。步进电动机是通过给内部多个线圈依次施加脉冲电流实现电动机的连续转动,改变脉冲的频率即可改变电动机的转速,改变施加脉冲的顺序即可改变电动机的转动方向,实现机器人的位置控制。而伺服电动机是一个连续转动的直流电机,通过闭环反馈控制回路,以实现精确的位置控制。
- 新型驱动器可实现优良的特色驱动特性:静电驱动器可利用电荷间引力和排斥力的互相作用顺序驱动电极而产生平移或旋转;形状记忆合金驱动器由于具有形状记忆效应,即力作用后会发生弹性变形;压电效应驱动器在外力作用下不仅几何尺寸会发生变化,而且内部也会出现极化,当外力消失时,材料重新恢复到原来的状态,电场也随即消失,因此称为压电效应;为了更好地模拟生物体的运动功能以应用于智能机器人,目前已经研制出了各种不同类型的人工肌肉。

(4) 控制计算机

控制计算机可实现智能机器人的智能感知、认知理解、决策控制、任务协同等处理与管理任务。其发展具有以下趋势:

- 从通用到专用,从联机到嵌入:采用通用计算机作为机器人的计算与控制平台,与机器人主体通过专线或网络在线连接,这是早期的纯软件解决方案,其具有系统开发的方便性和功能实现的灵活性,但其难以支持智能机器人的集成性、移动性及微型化等需求。因此,采用嵌入式计算机,配置专用处理硬件的软硬件结合解决方案成为智能机器人控制计算机的主流方案。例如,采用大规模集成电路芯

片微控制器 (MCU) 作为智能机器人控制计算机, 其内部集成中央处理器单元 (CPU)、各种存储器 (RAM、ROM、EPROM、EEPROM 和 Flash ROM)、多种输入/输出接口等众多功能部件, 一片芯片构成了一个基本的嵌入式微型计算系统。例如, 意法半导体 (GT) 公司研发的微控制器 STM32 F7 已在新一代智能机器人系统中得到了应用。

- 从单处理器到多处理器, 从集中结构到分布结构: 随着智能机器人智能程度的不断提高, 其处理系统对实时性、数据量和计算要求的不断提高, 采用高性能嵌入式处理器与高速 DSP 处理器、单片微控制器结合组成的异构多处理器成为智能机器人处理平台的主要方式; 随着智能传感器的发展, 大型智能工业机器人的功能与结构更加复杂, 集中处理方式已经难以满足功能扩展、结构演化的需求, 基于机器人内部网络的分布式处理成为一种新型结构。

(5) 人机交互与网络通信接口

为了实现智能机器人与操作人员的交互与协同, 以及与其他智能机器人的通信与协作, 智能机器人必须配置多样化的人机交互与网络通信接口。

- 人机交互多样化: 机器人的人机交互实现了操作人员参与智能机器人控制并与机器人交流。最早的机器人人机交互的方式是通过鼠标、键盘等接触式接口实现的, 交互方式呈机械化。随着传感器技术的发展, 机器人人机交互的方式体现出了多样化。基于视觉或语音的人机交互方式是主流交互方式之一, 但其感知范围和操作员的临场感受到了限制; 基于穿戴式设备的交互方式可以大大增强操作员的临场感, 但价格昂贵, 以及对人类肢体的束缚使其目前还难以大范围推广; 采用深度摄像机获取人手三维位置数据、采用惯性测量单元获取人手三维姿态数据形成混合传感器的交互方法, 可实现人与机器人之间基于手势的自然交互; 为了突破传统机器人控制的专用复杂性与封闭性, 有研究者创新地将 iPhone 等智能手机和先进的交互技术 (如 MULTI-TOUCH、加速计等) 与机器人技术有机融合, 实现了具有基于 HMM 和人体动作控制解析能力的高易用性人机接口; 诞生于 20 世纪的虚拟现实眼镜基于眼球追踪技术, 具有良好的沉浸性和实时交互性, 已成为聊天等智能服务机器人的主流人机交互方式; 利用 4G 技术接入 Internet 构建具有实时网络视频反馈的远程智能机器人控制平台, 可形成控制灵活、无距离限制的高友好度的机器人人机交互模式; 未来的智能机器人人机交互是一种包括语音、肢体动作、面部特征等综合的自然人机交互方式。
- 多机协同网络化: 在工业、军事等应用领域, 往往需要发挥多个智能机器人的功能分布及时空分布等特点, 多机器人协同操作, 共同完成预定的复杂任务, 这就需要相应的通信网络对其提供支持。基于有线局域网和无线局域网通信技术及其

应用已经普及，多智能机器人通信网络大多在有线局域网或无线局域网的基础上依据多机器人组成结构和应用场景等特点进行扩展和优化实现。例如，多移动机器人采用 Ad hoc 网络，依据多机器人的主从结构采用 C/S 通信控制，为了组网的方便性和增强抗毁性采用点对点的对等通信模式等。需要优化之处主要是提高网络通信的实时性和可靠性、网络组织的灵活性和快捷性。

1.2.2 智能机器人的软件系统

除了上述智能机器人的机械本体和硬件组成之外，软件系统也是智能机器人的重要组成部分。其运行在智能机器人特定的硬件平台之上，不仅实现了机器人运动位置控制、姿态轨迹计划、操作顺序管理、人机友好交互及多机通信与协同等功能，而且支持智能机器人软件与系统的仿真、开发、测试与验证等环节。

1. 智能机器人的软件系统结构

智能机器人的软件系统一般分为运行时支持系统和仿真开发平台两大部分。如图 1-2 所示。

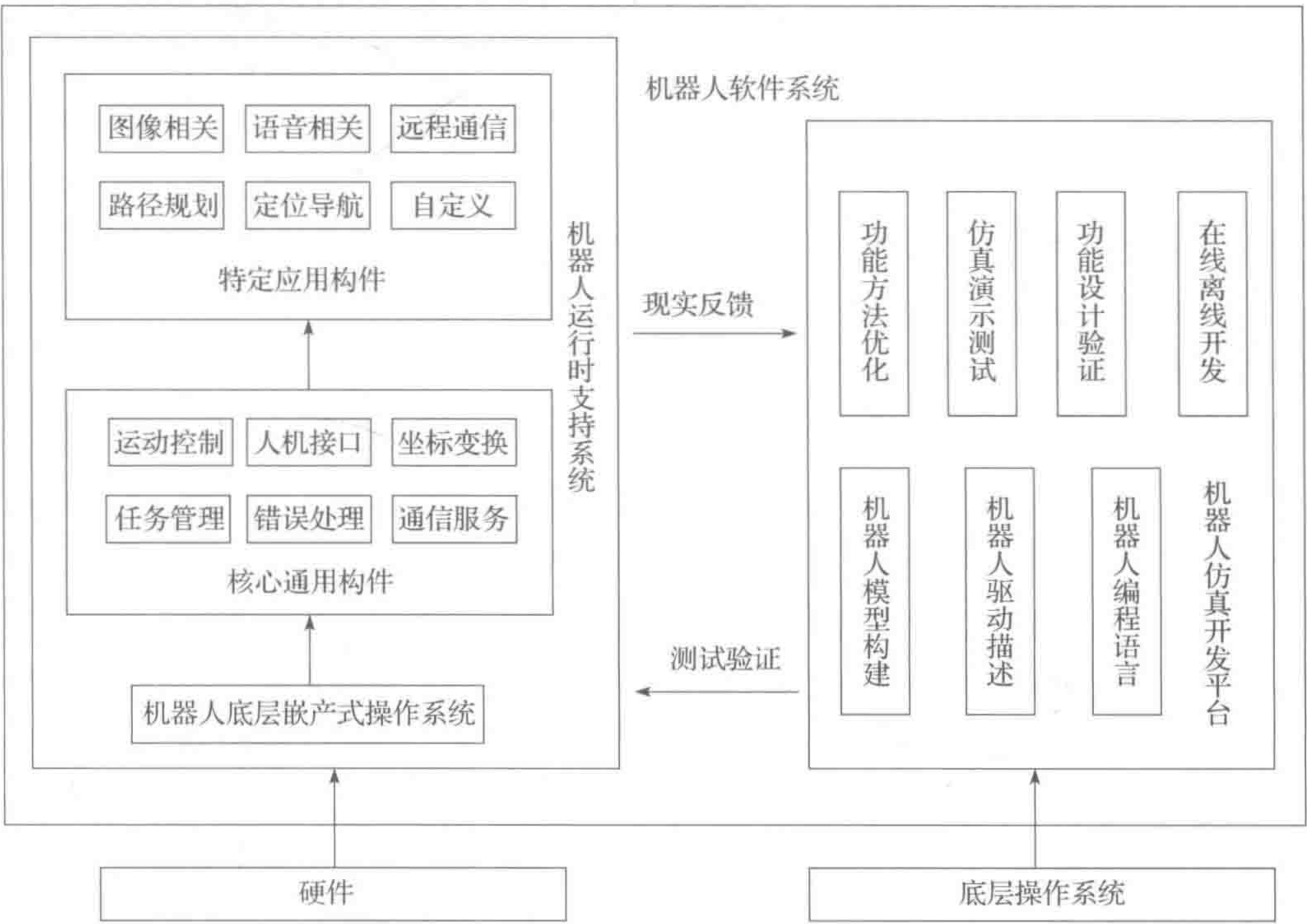


图 1-2 智能机器人的软件系统

运行时支持系统驻留在智能机器人的处理机平台之上，通常采用层次化结构。自底向上的第一层是开源多任务操作系统 Linux 或专用嵌入式实时操作系统，其除了实现基

本的处理资源管理、多任务调度之外，还实现了与智能机器人硬件驱动的适配；第二层是核心通用构件层，实现运动控制、坐标变换、人机交互等通用功能；第三层是特定应用构件层，其实现图像处理、路径规划、定位导航等应用支持功能。三个层次分别面对不同的功能需求，对应于不同层次的开发，系统中各个层次内部均是由若干个功能相对应的系统构件组成的，这些功能构件相互协作共同实现该层次所提供的功能。

智能机器人仿真开发平台可以在宿主机上运行，主要支持实现智能机器人运行软件的高效开发。不仅支持智能机器人的模型构建，而且具有驱动描述、编程语言支持等能力；不仅支持功能设计验证，而且具有运行环境仿真、动态可视演示等能力。由此可知，智能机器人仿真开发平台是其软件系统必不可少的一部分，并且具有面向特定领域的适应性和智能化软件应用开发的高效性等特点。

2. 智能机器人操作系统

如前所述，可以将智能机器人看作一个特殊用途的专用嵌入式控制系统，犹如智能手机作为移动终端专用嵌入式系统，配置安卓等操作系统后，不仅使用方便，而且有利于高效应用开发，更可通过 APP 下载无限扩展其能力，智能机器人也可配置相应的操作系统。智能机器人操作系统的主要功能是屏蔽异构的机器人硬件资源，实现实时多任务调度与分布式实时通信、支持多模式人机交互，并支持智能机器人应用软件的高效开发，从而有效管理机器人硬件与软件资源。智能机器人操作系统的实现存在多种途径，主流途径是基于已有的 Linux、Windows 等操作系统内核，依据智能机器人的特点与需求进行优化和扩展，也有完全设计适应智能机器人特点的全新操作系统。需要说明的是，有的虽称为智能机器人操作系统，但其本质已超越了传统计算机操作系统的职能，以智能机器人中间件和开发环境为主体。

3. 智能机器人软件构件化

构件化是一种提高机器人软件重用性和降低系统设计难度的主流方法。实现机器人软件系统构件化的前提是机器人系统从功能上被分解成了各种可重用的构件。为此需要建立构件的静态模型和运行时模型，并设计基于模型的构件接口定义语言，不同构件之间的通信可通过相应的中间件来实现，最终通过构件之间的聚集和整合高效地形成完整的机器人软件系统。

首先，机器人系统被分成控制系统和被控系统。控制系统是机器人控制软件或者算法，被控系统是机器人硬件。为了实现机器人系统的构件化设计和软件的重用，可采用基于构件的抽象模型以解除控制系统和被控系统之间的紧耦合。如图 1-3a 所示，机器人中间件把机器人系统分成软件系统和硬件系统两个部分，机器人中间件的下层是机器人硬件系统，由不同的传感器、执行器和其他硬件设备组成。中间件的上层是机器人控制软件，由不同的机器人软件构件、控制算法和服务组成。机器人中间件隐藏了底层硬件

的异构性，同时还提供了独立于机器人硬件系统的构件接口，这些接口可用于上层构件或具体应用。为了提高软件的可重用性，机器人软件系统被分解成一系列的不同类型和不同粒度的可重用软构件。

在图 1-3b 中，水平方向的机器人系统被分成不同的功能构件。这些不同功能构件的设计开发者能够专注于他们各自的功能实现，机器人系统集成者能够根据标准接口快速地集成不同的功能构件并开发机器人软件系统，而不需要理解功能构件特定的实现细节。

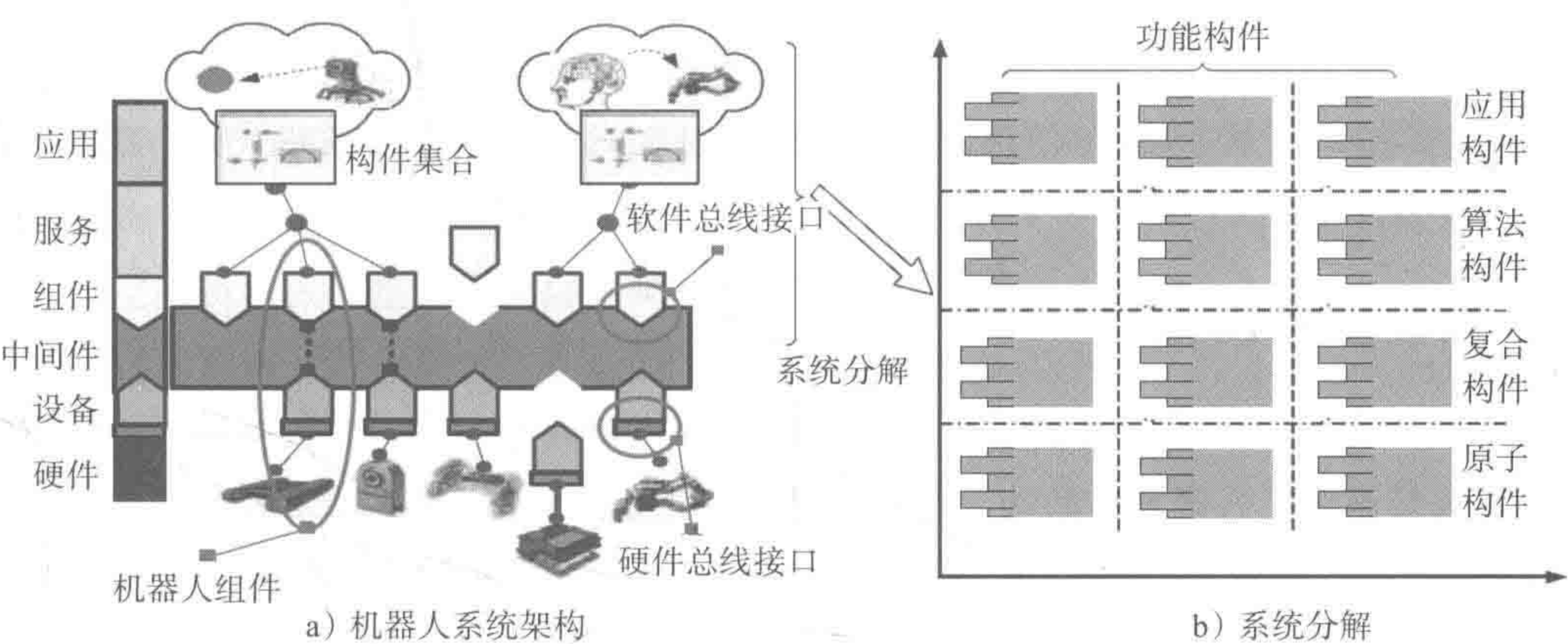


图 1-3 构件化机器人软件系统架构

在垂直方向存在 4 种不同程度细粒度的构件，这些都是基于不同程度的抽象和重用性，具体如下。

- 原子构件：原子构件适合于硬件组件有直接联系的唯一构件，其是一种特殊的硬件抽象，并且提供了对高层构件调用的统一接口，如电动机控制原子构件、传感器控制原子构件等。
- 复合构件：根据一些功能需求和组合规则，一些原子构件被组合在一起形成复合构件，这些构件提供了更高层次和更大粒度的构件抽象。
- 算法构件：算法构件是一种与平台独立的机器人算法实现，或者是一般机器人控制算法，如路径规划、卡尔曼滤波等。
- 应用构件：应用构件包括原子构件、复合构件和算法构件各种类型构件的组合，用于实现机器人系统的应用功能。

4. 智能机器人开源共享软件

目前世界上各大工业机器人厂商均开发了各自的机器人软件系统。这些软件系统往往是私有且封闭的，厂商只提供了固定的操作方式和十分有限的编程接口供用户使用。对于机器人研发者来说，如果购买这些厂商的机器人进行进一步研发，会受到很多限制；

而自行开发从底层到上层的完整软件系统，又会成本过高并且不现实。

另外，虽然不同的机器人和不同的应用环境对机器人软件系统的要求是不同的，但是有不少功能是每个开发者都要面对的共性问题，比如坐标变换、模块间通信等。如果每个研发者都要自行开发这些共性功能，不仅浪费时间，分散研发者的资源，并且使研发者无法充分投入到更有意义及价值的目标研发中。

针对这些问题的解决需求，开放源代码的机器人操作系统（RobotOperating System, ROS）应运而生。2010年Willow Garage公司发布了开源机器人操作系统ROS，很快在机器人研究领域展开了学习和使用ROS的热潮。其宗旨在于构建一个能够整合不同研究成果，实现算法发布、代码重用的机器人软件平台。ROS中实现了大量的机器人技术中的共性问题，这使得ROS的使用者可以充分复用ROS中已有的高质量代码，而不必自己重复开发。

1.3 智能机器人的分类

智能机器人依据其活动方式可分为固定型和移动型两大类。前者是其整体位置固定，主要是靠机器人臂自主活动，自动完成指定任务；而后者是机器人整体可依据任务需求自主活动。更多情况下则是依据智能机器人的用途进行分类，因为不同用途的智能机器人，其组成结构、实现功能、活动形态等都具有较大差别。据此，一般可将其分为工业智能机器人、农业智能机器人、探索智能机器人、服务智能机器人等。

（1）工业智能机器人

工业智能机器人依据具体应用的不同，通常又可以细分为焊接机器人、装配机器人、喷漆机器人、码垛机器人、搬运机器人等多种类型。作为具有智能的工业机器人，它们在很多方面已经超越了传统机器人。焊接机器人包括点焊和电弧焊机器人，其用途是实现自动的焊接作业。装配机器人比较多地用于电子部件及电器等装配。喷漆机器人代替人进行喷漆作业。码垛、上下料、搬运机器人的功能则是根据一定的速度和精度要求，将物品从一处搬运到另一处。在工业生产中应用各种机器人，可以方便迅速地改变作业的内容或方式，以适应生产要求的变化。例如，改变焊缝轨迹、改变喷漆位置、变更装配部件或位置，等等。随着对工业生产线柔性的要求越来越高，对各种机器人的需求也就越来越强烈。

（2）农业智能机器人

随着机器人技术的进步，以定型物、无机物为作业对象的工业智能机器人正在向更高层次的以动、植物之类复杂作业对象为目标的农业机器人发展，农业智能机器人或机器人化的农业机械的应用范围正在逐步扩大。农业智能机器人的应用不仅能够大大减轻甚至代替人们生产劳动，从而解决劳动力不足的问题，而且可以提高劳动生产