

» 人工智能与大数据丛书



机器人

视觉伺服控制

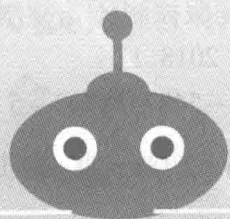
徐德刚 沈添天 谢永芳 潘 晴 / 编著

JIQIREN
SHIJUE SIFU KONGZHI



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

人工智能与大数据丛书



机器人

视觉伺服控制

徐德刚 沈添天 谢永芳 潘 晴 / 编著

JIQIREN

| KONGZHI



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长沙 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

机器人视觉伺服控制 / 徐德刚等编著. --长沙: 中南大学出版社, 2018. 11

ISBN 978 - 7 - 5487 - 1793 - 5

I. ①机… II. ①徐… III. ①机器人视觉—伺服控制
IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 048169 号

机器人视觉伺服控制

徐德刚 沈添天 谢永芳 潘 晴 编著

☐责任编辑 韩 雪

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

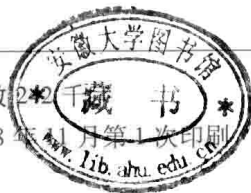
☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 710 × 1000 1/16 ☐印张 12 ☐字数 29 千字

☐版 次 2018 年 11 月第 1 版 ☐印次 2018 年 11 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1793 - 5

☐定 价 40.00 元



图书出现印装问题, 请与经销商调换

人工智能与大数据丛书

编委会

主 任 桂卫华

副主任 邹北骥 吴成东

委 员 (按姓氏笔画排序)

田 锦 老杨松 张祖平 李建奇

肖卫东 陈 龙 胡 明 赵 文

饶先宏 徐德刚 雷向东

内容简介

本书系统、深入地总结了近年来笔者在机器人视觉伺服控制领域科研、教学过程中的成果，吸收并借鉴了国内外期刊论文的最新研究成果，较为系统地叙述了机器人视觉伺服控制技术的相关理论。全书共7章，内容包括机器人的发展、机器人的组成、机器人的信息获取、机器人的位置姿态描述、视觉伺服控制原理、机器人的路径规划、机器人运动学建模、动力学建模以及机器人控制方法。本书内容新颖，注重理论与实际应用相结合。

本书可作为高等院校高年级本科生和研究生学习的参考书，也可供机器人、人工智能、电子自动化及相关领域的广大工程技术人员与科研工作者自学和参考。

前言

机器人已在制造业、服务业、国防安全和太空探索等领域得到了广泛应用，国内外对机器人技术的发展越来越重视，全球正进入到智能机器人的研究发展新时代。机器人作为高端制造装备的重要组成部分，具有明显的产业特征，是制造业实现数字化、智能化和信息化的重要载体。机器人及以其为主体的自动化成套装备推动着制造业由密集型手工作业向信息化、自动化方向升级，是提升制造产业发展质量和竞争力的重要途径。美国为配合制造业回归和再工业化国家战略启动了“美国国家机器人计划”；欧盟在第七框架计划(FP7)中规划了“认知系统与机器人技术”研究；日本发布的“新经济增长战略”将机器人产业列入七大重点扶持产业之一；韩国发布“机器人未来战略展望 2022”，支持扩大韩国机器人产业；德国提出“工业 4.0”计划，支持发展基于机器人技术的智能制造系统。我国政府高度重视机器人产业发展，2014 年 6 月，习近平总书记在两院院士大会的报告中提到，“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”。2015 年 11 月，李克强总理向在北京召开的世界机器人大会批示中指出，“机器人是衡量现代科技和高端制造业水平的重要标志，也是抢占智能社会发展先机的战略领域”。因此，机器人技术是未来高新技术产业发展的基础之一，对于国民经济和国防建设具有重要意义。

在智能制造过程中的机器人需要具有智能感知外部复杂环境、自主规划作业路径的能力，以适应动态变化的非结构环境下复杂作业任务。视觉传感器作为非接触式外部传感器，可用来感知环境的动态变化，具有信息量大、适用范围广等特点。机器人视觉伺服是指利用视觉传感器提供的环境信息对机器人进行实时反馈控制，有利于提高机器人的自主操作能力、增加机器人对周围环境的自适应性，拓宽机器人的应用领域，已成为机器人学的重要研究内容。

机器人视觉伺服控制作为机器人控制的新兴交叉学科方向，涉及信号处理、机器视觉、自动控制、机械工程、嵌入式系统等领域。本书是笔者及其所在团队在教学、科研过程中的成果总结，吸收并借鉴了国内外期刊论文的最新研究成果及相关书籍编著而成，较为系统地叙述了机器人视觉伺服控制技术的相关理论。本书对视觉信息的获取与处理、机器人的位置与姿态描述等基础理论知识进行分章节叙述，对视觉伺服控制器、基于几何形状的视觉伺服控制、路径规划、机器

人控制方法等上层控制部分进行了叙述。本书以视觉信息获取与控制的角
度,以能够进行实例验证为目标,以机器人的视觉控制为背景,系统全面地介绍了视觉系统的构成和标定、视觉信息的处理方法、视觉控制的原理与实现,并给出机器人视觉控制及路径规划的实例。全书共7章,第1章阐述了机器人的发展历史、机器人的结构与分类、机器人视觉伺服控制系统以及视觉伺服控制技术等;第2章叙述了视觉信息获取与处理,包括数字图像的获取和处理、相机标定、目标物的特征提取与跟踪;第3章叙述了空间中的位置和姿态描述,包括二维、三维空间位姿表示形式以及三维重构的基本概念;第4章综合介绍了机器人的视觉伺服控制技术,详述了两种经典的视觉伺服控制方法:基于图像和基于位置的视觉伺服控制技术,简单介绍三种较为先进的视觉伺服控制方法;第5章介绍了基于几何形状的视觉伺服控制,讨论了利用线段、直线、圆等平面几何和球体、圆柱等立体几何的局部特征作为图像信息进行视觉伺服控制,分别介绍了关于圆、球体、圆柱目标的视觉伺服控制实例,通过实例给出伺服控制中目标在图像空间的投影变化轨迹以及相机在工作空间的移动变化轨迹;第6章分析了机器人的路径规划技术,讨论约束路径两端边界条件的常规路径规划方法,再进一步阐述融合复杂关节、空间活动限制和视觉约束的路径规划方法,并在第5章关于圆、球体、圆柱目标的视觉伺服控制实例基础上引入路径规划方法;第7章对多自由度串联工业机器人控制问题进行分析,详述了机器人的建模、独立关节控制、动力学控制方法以及机械臂视觉伺服控制方法等。

本书的第1章、第3章、第4章和第5章由徐德刚执笔,第2章由谢永芳执笔,第6章由沈添天执笔,第7章由潘晴执笔,全书由徐德刚统编全稿。研究生周雷、洪松涛、李德昀、李翔鑫、罗仔明等参与了本书的撰写,并提供了基本的素材。

本书的编写工作和出版得到了中南大学、中南大学信息科学与工程学院相关领导的大力支持。本书部分研究得到了国家科技部重点研发计划、国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金杰出青年项目、国家自然科学基金创新研究群体项目等部分资助,作者在此表示诚挚的感谢。本书的出版得到了中南大学出版社的大力支持和帮助,作者在此表示衷心的感谢。本书的部分内容,采用了作者所在研究课题组的研究成果,特别感谢与作者共同研究并对这些研究成果做出贡献的研究人员。

近年来,机器人视觉伺服控制的研究发展迅速,涉及诸多学科领域,笔者虽然力图在本书中详述机器人视觉伺服控制的主要研究进展,但由于机器人视觉伺服控制技术一直处于不断发展之中,再加上作者水平有限,书中难免存在错漏及不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2018年3月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 机器人的发展	(1)
1.2 机器人的组成	(4)
1.2.1 机械本体结构	(5)
1.2.2 机器人传感器	(6)
1.2.3 驱动装置	(7)
1.2.4 控制系统	(8)
1.2.5 机器人技术指标	(9)
1.3 机器人视觉伺服控制系统	(10)
1.4 视觉伺服控制技术	(15)
1.5 本章小结	(17)
第2章 视觉信息获取与处理	(18)
2.1 数字图像模型描述	(18)
2.1.1 数字图像获取	(18)
2.1.2 图像形成模型	(20)
2.1.3 数字图像表示	(20)
2.2 数字图像处理	(22)
2.2.1 灰度变换	(22)
2.2.2 数学形态学	(26)
2.3 相机标定	(34)
2.3.1 坐标转换	(34)

2.3.2	相机针孔模型及其成像原理	(37)
2.3.3	相机张氏棋盘标定方法	(39)
2.4	目标物特征提取与跟踪	(43)
2.4.1	角点检测	(43)
2.4.2	SIFT 算法	(45)
2.4.3	边缘检测	(46)
2.4.4	哈夫变换	(51)
2.4.5	目标跟踪算法概述	(53)
2.4.6	Mean Shift 跟踪算法	(54)
2.5	本章小结	(56)
第3章	位置与姿态描述	(57)
3.1	二维空间位姿描述	(57)
3.2	三维空间位姿描述	(59)
3.2.1	位置矢量和旋转矩阵	(59)
3.2.2	齐次变换矩阵	(61)
3.2.3	描述旋转变换的方法	(66)
3.2.4	单位四元数	(69)
3.3	三维重构	(74)
3.3.1	相机参数及坐标系	(75)
3.3.2	对极几何	(77)
3.3.3	基础矩阵	(78)
3.3.4	八点算法	(78)
3.3.5	本质矩阵	(80)
3.3.6	三维点的还原	(81)
3.4	本章小结	(82)
第4章	视觉伺服控制器	(83)
4.1	概述	(83)
4.2	基于图像的视觉伺服 (IBVS)	(85)
4.2.1	图像雅可比矩阵	(85)
4.2.2	稳定性分析	(91)
4.2.3	多相机立体视觉系统	(92)

4.2.4 图像点的圆柱坐标系表示	(93)
4.2.5 非透视投影模型	(93)
4.3 基于位置的视觉伺服(PBVS)	(95)
4.4 经典视觉伺服控制器存在的问题	(98)
4.4.1 基于图像的视觉伺服存在的问题	(98)
4.4.2 基于位置的视觉伺服存在的问题	(102)
4.5 高级视觉伺服控制器	(102)
4.5.1 混合视觉伺服	(102)
4.5.2 分区视觉伺服	(104)
4.5.3 切换视觉伺服	(104)
4.6 本章小结	(105)
第5章 基于几何形状的视觉伺服控制	(106)
5.1 概述	(106)
5.2 平面几何形状	(108)
5.2.1 线段特征	(109)
5.2.2 直线特征	(110)
5.2.3 圆特征	(112)
5.3 立体几何形状	(118)
5.3.1 球体特征	(118)
5.3.2 圆柱特征	(123)
5.4 本章小结	(128)
第6章 路径规划方法	(130)
6.1 常规路径规划方法	(130)
6.1.1 直线路径	(130)
6.1.2 多维路径	(131)
6.2 基于势场法的路径规划	(133)
6.3 基于多项式优化的路径规划	(137)
6.3.1 参数化模型	(138)
6.3.2 多约束和限制问题	(140)
6.3.3 基于几何实体的多约束路径规划示例	(147)
6.4 本章小结	(151)

第7章 机器人控制方法	(152)
7.1 机器人建模	(152)
7.1.1 机器人运动学分析	(152)
7.1.2 机器人动力学分析	(160)
7.1.3 机器人运动雅可比矩阵	(163)
7.2 独立关节控制	(165)
7.2.1 关节驱动方式及模型	(165)
7.2.2 关节位置控制	(166)
7.2.3 关节速度控制	(167)
7.3 机械臂动力学控制方法	(167)
7.3.1 机械臂线性化模型	(168)
7.3.2 常用动力学控制方法	(169)
7.4 机械臂视觉伺服控制方法	(170)
7.4.1 视觉伺服中模型不确定性的处理	(172)
7.4.2 视觉伺服中约束的处理	(173)
7.5 本章小结	(174)
参考文献	(175)

第1章 绪论

机器人是人工智能技术、自动控制技术、传感器技术和计算机技术等多种科学技术融合的产物，是高新技术的代表。近半个世纪以来，机器人的发展已经对整个工业生产、太空和海洋探索以及人类生活的各方面产生越来越大的影响。近年来，随着对机器人的应用需求日益复杂多样，相机作为帮助机器人获得周围环境信息和任务信息的一种非接触式外部传感器，可感知机器人在定位和跟踪任务中环境的动态变化，具有获取信息量大、适用范围广等优点，提高了机器人系统的灵活性和精确性，促进了机器人视觉伺服控制技术的形成。机器人的视觉伺服控制基于相机实时感知检测机器人与目标物体的相对位姿，根据获得的视觉信息实现对机器人的运动控制，是未来机器人学领域的重要研究方向。本章首先介绍机器人的发展历程，然后阐述了机器人的组成，包括其机械结构、传感器、驱动装置、控制系统、技术指标等，同时阐述了机器人视觉伺服控制的基本原理。

1.1 机器人的发展

机器人的发展历史主要分为三个时期：早期、中期和现代。美国机器人协会早期对机器人的官方定义为：“机器人是一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过程序动作来执行各种任务的可编程多功能操作机。”历史上有很多关于早期机器人雏形的记载，其中比较有代表性的是18世纪法国发明家约瑟夫·玛丽·贾卡设计的可编程织布机——贾卡机(图1-1)，它通过一套打洞卡片系统来编辑织布机上的图样。这种织布机已经具有能进行工作任务、可编程设计等现代机器人的特点。

机器人发展的中期是20世纪50年代到70年代，这也是机器人高速发展的时期。1959年工业机器人之父恩格尔博格制造出第一台工业机器人Unimate。这是一台用于压铸的五轴液压驱动机器人，包含一个机械臂与一个末端的夹具，机器人本体安装在导轨上，采用分离式固体数控元件，利用转动鼓轮上的磁性图进

行编码。手臂的控制由一台计算机完成,它能够记忆完成 180 个工作步骤。这一时期还诞生了世界上第一台使用触觉传感器的机器人——MH-1 机械臂。该机械臂能在计算机控制下利用触觉传感器捡起多种物体。1966 年美国斯坦福国际研究所研制了首台采用人工智能学的移动机器人 Shakey,它能够自主进行感知、环境建模、行为规划操作并执行任务(如根据指令发现并抓取积木放置到指定位置)。20 世纪 70 年代以后,人类对机器人的研究重点放在了使用外部传感器改善机器人的操作性上,如 1979 年 Unimation 公司推出了通用工业机器人 PUMA(图 1-2),并应用于通用汽车装配线,这是工业机器人成熟的标志。PUMA 机器人采用全电驱动,关节结构,多 CPU 二级微机控制,并采用 VAL 专用语言,可配置力学视觉传感器,在当时而言是一款十分先进的机器人。1997 年日本的本田公司制造出了世界上第一款直立行走机器人 P2,能完成上下台阶、推车等动作,该机器人的成功研制对于整个机器人的发展史具有里程碑的意义。

之后的 30 年中,涌现出 KUKA、FANUC、ABB 等大量机器人公司。随着传感技术和控制技术的发展,这些公司生产的机器人已经朝着智能化发展,不仅能在结构化的环境中完成固定操作的流程工序,取代部分人工操作,还能在非结构化环境中作出应对策略。如今,机器人领域正朝着多传感器融合、双臂协作、人机交互等方向发展,其中最具有代表性的是 2015 年 ABB 公司发布的 YUMI 双臂机器人(图 1-3)。这款机器人能够与人类进行近距离协作,完成基于机器视觉的部件定位、引导式编程以及精密运动控制。

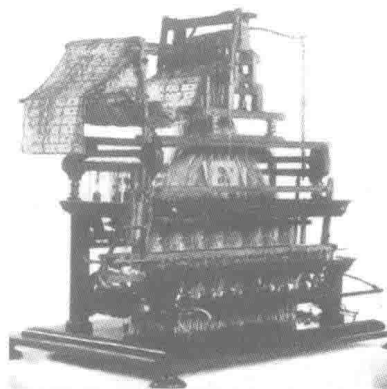


图 1-1 世界上第一台可编程织布机

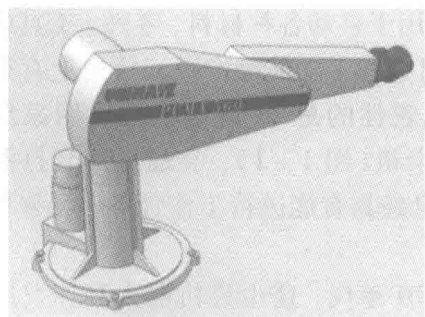


图 1-2 PUMA 工业机器人

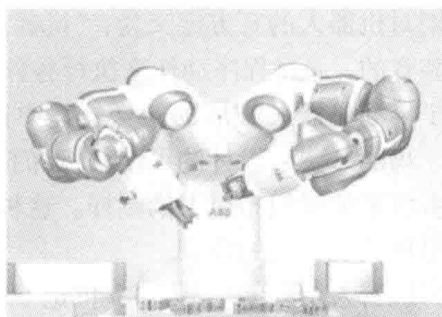


图 1-3 YUMI 双臂机器人

按照其应用领域,机器人可以归类为工业机器人、个人/家用服务机器人、专业服务机器人。

①工业机器人泛指工业加工过程中用于搬运、运输、焊接、喷涂、包装、切割的机器人。当前所使用的工业机器人以臂型机器人为主(图1-4),还有其他类型如移动小车、自动切割机等。现阶段的工业机器人普遍是结构化环境操作机器人,包括当前受到广泛关注的双臂机器人,图1-5所示为双臂协作机器人Baxter,它在固定的简单环境内有着很高的工作效率与工作精度,已经基本取代人工,成为加工生产的主力。



图 1-4 典型的工业机械臂

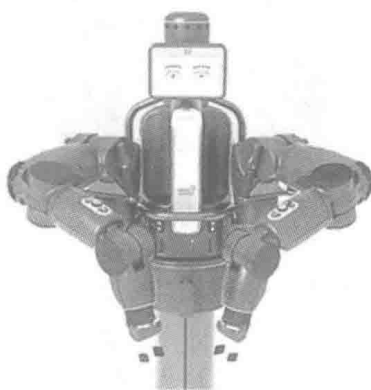


图 1-5 双臂协作机器人 Baxter

②个人/家用服务机器人虽然起步较晚,但是得益于成熟的计算机与传感技术,发展十分迅速。服务业作为国民经济的支柱产业,智能服务机器人必然会在其中占据一席之地。虽然服务机器人目前处于起步阶段,但凭借控制技术的发展与机器学习的热潮,服务机器人将会更加拟人化、智能化。导引机器人是服务机器人的研究热点,例如,会24种方言的导引机器人“优友”,如图1-6所示。现阶段的导引机器人还属于结构化环境操作机器人,只能根据程序确定的模式做出程序化反应,远远没有达到智能化水平。

③专业服务机器人包括国防机器人、医疗机器人、仿生机器人、太空机器人等,这类机器人对专业性、可靠性有着极高的要求。

国防机器人可以分为地面机器人、仿人机器人、水下机器人及飞行机器人。这一类机器人能够在战争或其他危险工况下避免人的伤亡,已经成为世界各国壮大国防实力的研究方向。

医疗机器人也是目前机器人领域的一个研究热点,是集医学、生物力学、机械学、材料学、计算机图形学、数学分析等诸多学科为一体的新型交叉研究领域,具有重要的研究价值。图1-7所示是目前获得美国FDA认证的达芬奇手术机器

人,医生通过摄像头传回的图像获取手术部位信息,依靠踏板控制摄像头和手术器械,依靠主控手柄遥控机械臂完成外科手术。

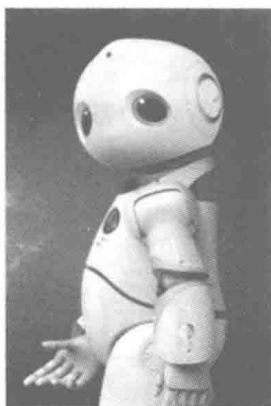


图 1-6 会 24 种方言的导引机器人优友



图 1-7 达芬奇手术机器人机械臂

随着机器人应用从工业领域向社会服务、环境勘测等领域扩展,要求机器人在结构、感知、控制、智能等方面适应新环境、新任务、新需求,对生物结构和运动方式进行仿生是研发适应某种特定环境的机器人系统的基本方法之一。由于仿生机器人是受生物启发而研发成功的,所以很多科学家从自然界中寻找灵感,寻找解决新问题的方法。目前许多研究机构已经成功设计出如仿生机器鱼、蛇形机器人、仿生鸟等适应特定环境的仿生机器人系统。

太空机器人是在地外行星上完成勘探作业的移动机器人,极端的工作环境给这类机器人的研发带来了新的挑战。近年来,美国开发的用于火星探测的移动机器人“探路者”“勇气号”和“好奇号”都成功登陆火星并开展相关科研探测工作。我国在太空机器人研究方面经长期努力也取得了丰厚的成果,哈尔滨工业大学、北京航空航天大学等针对空间作业臂上开展了相关研究工作,中科院沈阳自动化研究所、上海交通大学、国防科学技术大学、复旦大学等也研制了各具特色的月球探测器。

1.2 机器人的组成

作为典型的机电一体化设备,机器人一般由机械本体、控制系统、传感器和驱动器组成。

工业机器人是当前应用最为广泛的机器人,其系统的组成如图 1-8 所示。

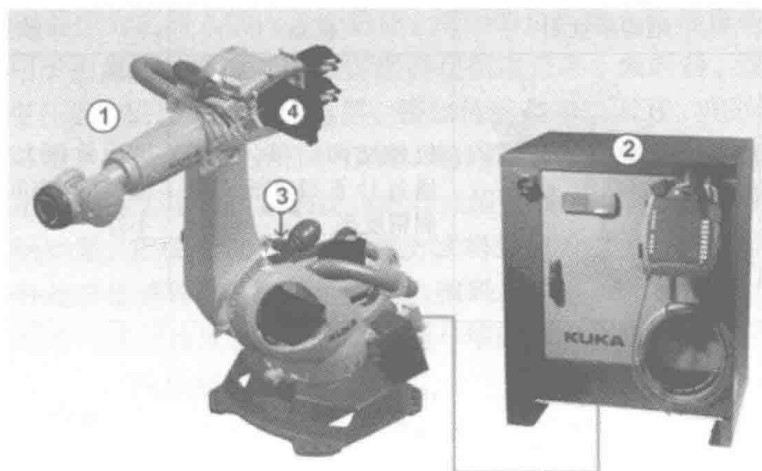


图 1-8 机器人系统

①—机械人本体；②—控制系统；③—传感器；④—为驱动装置

1.2.1 机械本体结构

机器人的机械本体一般包括臂部、腕部、手部、传动部件等。考虑到不同类型机器人的经济效益与适用性，机械本体的结构参数应与它所需要完成的任务相关。通常将本体能够独立运动的关节数目称为机构的运动自由度，简称自由度 (degree of freedom)。作为机器人的技术指标，机械本体的灵活程度可以根据其自由度衡量，自由度是机器人的一个重要技术指标，直接影响机器人末端操作结构的机动性。如图 1-9 所示的六轴工业机器人，能独立沿笛卡尔坐标系 x 、 y 、 z 轴进行平移，实现绕 x 、 y 、 z 轴的旋转，即有 6 种运动方式，这意味着它具有 6 个自由度。一般而言，串联式工业机器人轴的数量决定了其自由度，自由度越多就越接近人手的动作机能，通用性就越好，但是同时自由度越多结构越复杂，对机器人的整体性能要求也越高。

常见机械臂的机械本体几何结构分为四类：笛卡尔操作臂、柱面坐标操作臂、极坐标操作臂和关节坐标操作臂，如表 1-1 所示。

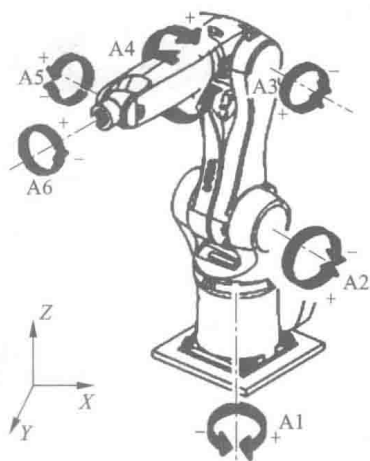
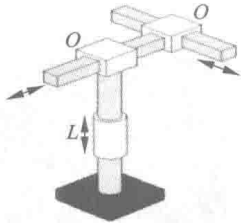
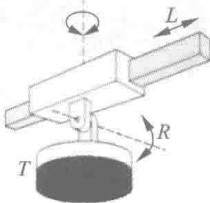
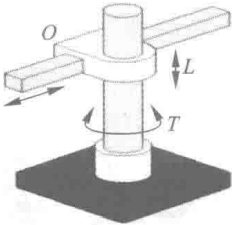
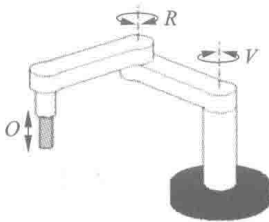


图 1-9 六轴工业机器人

表 1-1 经典机械臂机械本体几何结构

机械结构	结构示意图	优点	缺点
笛卡尔操作臂		机械结构简单,易于通过计算机实现,控制精度高	占地面积大,移动速度慢,工作空间大,密封性不好
极坐标操作臂		中心支架附近的工作范围大,覆盖工作空间较大,两个转动驱动装置容易密封	坐标复杂,难于控制,且直线驱动装置存在密封的问题
柱面坐标操作臂		计算简单,直线部分可采用液压驱动,可输出较大的动力,能够伸入型腔式机器内部	手臂可以到达的空间受到限制,不能到达近立柱或近地面的空间;直线驱动部分难以密封、防尘;后臂工作时,手臂后端易碰到工作范围内其他物体
关节坐标操作臂		常用于装配作业,最显著的特点是它们在 $x-y$ 平面上的运动具有较大的柔性,而沿 z 轴具有很强的刚性,在装配作业中获得了较好的应用	控制算法比较复杂,对控制系统的要求较高

1.2.2 机器人传感器

传感器是机器人的重要组成部分,是机器人感知外界环境的装置。机器人传感器有多种,根据其在机器人上的安装位置,分为内传感器和外传感器。机器人内传感器一般装在机器人的手臂上,内传感器包括位置传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器及力矩传感器,外传感器包括触觉传感器、距离传感器和