本书荣获第四届湖北出版政府奖

机器人学

建模、控制与视觉

（第2版）

熊有伦　李文龙　陈文斌　杨　华
丁　烨　赵　欢　李益群　杨吉祥　编著

华中科技大学出版社
http://www.hustp.com

本书荣获第四届湖北出版政府奖

机器人学

建模、控制与视觉

（第2版）

熊有伦　李文龙　陈文斌　杨　华
丁　烨　赵　欢　李益群　杨吉祥　编著

华中科技大学出版社
http://www.hustp.com
中国·武汉

内 容 简 介

为适应工业机器人、海陆空机器人和共融机器人快速发展的需要，突出机器人学的综合性、新颖性和前瞻性等特点，本书分建模、控制与视觉三个部分系统地阐述了机器人学的基础内容。

全书包含十六章。第1章为概述，介绍机器人的内涵、应用以及机器人学的研究方向。建模部分包括第2章至第7章，系统介绍机器人机构，位姿描述和齐次变换，刚体速度和静力，操作臂运动学、操作臂的雅可比矩阵和操作臂动力学。控制部分包括第8章至第11章，介绍轨迹生成、操作臂的轨迹控制、操作臂的力控制和协调控制。视觉部分包括第12章至第16章，介绍视觉图像处理、视觉运动控制、视觉导航定位、汽车式移动机器人和运动规划。

本书可供从事机器人研究开发的科技工作者参考，也可作为研究型大学本科生和研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

机器人学：建模、控制与视觉/熊有伦等编著. —2版. —武汉：华中科技大学出版社，2020.7
ISBN 978-7-5680-6235-0

Ⅰ.①机… Ⅱ.①熊… Ⅲ.①机器人学 Ⅳ.①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第127454号

机器人学：建模、控制与视觉(第2版)
Jiqirenxue：Jianmo，Kongzhi yu Shijue

熊有伦 李文龙 陈文斌 杨 华
丁 烨 赵 欢 李益群 杨吉祥 编著

策划编辑：俞道凯 王连弟
责任编辑：姚同梅 罗 雪
封面设计：原色设计
责任校对：吴 晗
责任监印：周治超

出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话：(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编：430223

录 排：武汉三月禾文化传播有限公司
印 刷：湖北新华印务有限公司
开 本：787mm×1092mm 1/16
印 张：28 插页：2
字 数：716千字
版 次：2020年7月第2版第1次印刷
定 价：88.00元

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

第2版前言

本书自2018年出版以来，受到了各方人士的广泛关注。许多机器人学专家和主讲教师对本书提出了他们的宝贵意见和建议。特别应该感谢的是天津大学黄田教授、燕山大学赵铁石教授、上海交通大学熊振华教授、中国科学技术大学陈小平教授、北京航空航天大学于靖军教授、清华大学刘辛军教授、西安交通大学徐海波教授等，他们在百忙之中参加了2019年12月在华中科学大学召开的首届“机器人学教学研讨会”，基于多学科综合及应用实践方面的考虑，从教材定位、内容选取、编排系统性和规范性等角度出发，指出了书中的缺点和错误，提出了改进意见，并阐述了对机器人学发展的深刻见解。他们的远见卓识，使我们受益匪浅。

为进一步完善本书，我们组织了本书的再版修订工作。此次修订删去了上一版中第13章“自适应控制”和第17章“飞行机器人”，对上一版第9章“操作臂的轨迹控制”、第11章“运动规划”和第16章“轮式移动机器人”进行了大幅修改，增加了对视觉导航定位的介绍，并对部分章节顺序进行了调整。具体分工如下：第1～7章由李文龙、陈文斌负责，第8～11章由赵欢、杨吉祥负责，第12～14章由杨华负责，第15～16章由李益群负责，参考文献及附录由李文龙负责。全书由熊有伦统稿和定稿。

此次修订得到了华中科技大学机械学院丁汉院长和王书亭副院长，以及数字制造装备与技术国家重点实验室的支持，在此深表感谢。在修订过程中，还得到了杨文玉教授和孙容磊教授的支持和帮助，谨致谢意。实际上书中的内容也反映了杨文玉教授和孙容磊教授多年的教学经验和研究成果。

机器人学科是不断发展的，限于作者的研究水平和教学经验，书中的错误和缺点仍不可避免，恳请读者批评指正（联系邮箱：reader_feedback@163.com）。

熊有伦　李文龙

2020年4月

第 1 版前言

21 世纪是机器人时代，是智能机器人时代，是人机共融、和谐发展的时代。机器人进入“海陆空”，融入人类社会，成为人们的万能伙伴，将会改变人类的生产方式、生活方式和思维方式。机器人作为传媒的热点，已成为家喻户晓、老幼皆知的话题。机器人学就是在这样的科技生态环境之下衍生而出的。本书面向机器人的未来世界，致力于机器人学的多学科综合交叉、融会贯通，为有关专业的大学生和研究生，以及机器人研究和开发人员提供系统性、基础性和前瞻性的知识。

机器人学是一门综合性学科，将会带动有关技术学科、信息学科以及传媒学科的深度融合与发展。机器人学也是一门课程，将逐渐成为研究型大学有关专业的主干课程。

全书包含十七章，主要内容分为三个部分：建模、控制与视觉。第 1 章为概述，介绍机器人的内涵、应用以及机器人学的研究方向。建模部分包括第 2 章至第 7 章，系统介绍机器人机构、刚体位姿描述和齐次变换、刚体速度和静力、操作臂运动学、雅可比矩阵和操作臂动力学。控制部分包括第 8 章至第 13 章，阐述轨迹生成、轨迹控制、力的控制、运动规划、协调控制和自适应控制。视觉部分包括第 14 章至第 17 章，介绍视觉图像处理、视觉运动控制、视觉导航、轮式移动机器人和运动规划。

我们在 20 世纪编写的《机器人学》一书出版至今已经 25 年。本书的前两部分主要参考了该书，仍然保留该书的部分内容，建模部分增添了一章“刚体速度和静力”，介绍李群的李代数、运动旋量和力旋量；控制部分增添了一章“运动规划”，介绍无碰撞路径规划的 $\mathcal{C}$-空间概念、人工势函数方法和导航函数；视觉部分的四章是新增加的，所介绍的有关内容已经成为机器人学的重要部分。

本书的出版是多项国家自然科学基金和国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目基金资助的结果，特别是 NSFC. No. 51327801 和 NSFC. No. 51475187；本书的出版得到了数字制造装备与技术国家重点实验室的资助，在此表示感谢。

本书的具体编写分工如下：第 2 章由陈文斌改写，第 7 章由丁烨和陈文斌改写，第 10 章由赵欢改写，第 14 和第 15 章由杨华编写，第 16 章由李文龙编写，第 17 章由陈文斌和丁烨编写，其余各章由熊有伦编写。全书由熊有伦修改定稿，李文龙和陈文斌协助整理。《机器人学》的两位作者丁汉教授和刘恩沧教授对本书的出版做出了重要贡献，丁汉教授对本书的编写还提出了许多宝贵意见和建议，在此深表感谢。

在编写的过程中，我们参照了《机器人操作》一书，许多教授还提供了宝贵的研究成果和教学经验，在此对杨文玉教授、尹周平教授、熊蔡华教授、孙容磊教授、唐立新教授、黄永安教授、陶波教授和张海涛教授等表示感谢。杨文玉教授和孙容磊教授等阅读了初稿，提出许多宝贵建议。李国民教授和黄田教授向我们介绍了美国和英国有关课程教学改革与教材建设的经验，并提出了许多有益的见解。董伟博士和黄剑博士为本书的出版也做出了贡献。实

际上，还有许多专家学者为本书的编写提供了帮助或参与了本书的编写，在此表示感谢。博士生时胜磊、宋开友、王刚、龚泽宇和张宇豪等，结合机器人学课程学习和科研，为本书的出版查阅文献、整理资料、编写程序，甚至协助编写了有关内容。华中科技大学出版社对本书的出版给予了极大的支持，王连弟社长和俞道凯分社长亲自进行选题策划，特别是姚同梅和罗雪两位责任编辑具备敬业精神和严谨学风，促使本书及时出版，保证了本书质量，在此深表感谢。

机器人学是一门综合性学科，涉及的专业范围很广，限于作者的研究水平和教学经验，书中的错误和缺点不可避免，希望读者批评指正。

熊有伦　2017 年 7 月
华中科技大学机械学院

目　录

第 1 章　概述 …… (1)

1.1　机器人的内涵 …… (1)

1.2　机器人的应用与发展 …… (4)

1.3　机器人学的研究展望 …… (7)

1.4　机器人学:建模、控制与视觉 …… (11)

第 2 章　机器人机构 …… (14)

2.1　运动副 …… (14)

2.2　串联机器人机构 …… (15)

2.3　并联机器人机构 …… (20)

2.4　机器人手爪 …… (24)

2.5　探测车悬架机构 …… (27)

2.6　多足步行机器人机构 …… (29)

2.7　RV 减速器和谐波减速器 …… (31)

习题 …… (34)

第 3 章　位姿描述和齐次变换 …… (36)

3.1　刚体位姿描述 …… (36)

3.2　齐次坐标和齐次变换 …… (40)

3.3　运动算子 …… (43)

3.4　变换矩阵的运算 …… (44)

3.5　RPY 角与欧拉角 …… (49)

3.6　旋转变换通式 …… (52)

3.7　位姿的综合 …… (57)

3.8　计算的复杂性 …… (59)

习题 …… (60)

第 4 章　刚体速度和静力 …… (63)

4.1　线矢量 …… (63)

4.2　微分转动与转动速度 …… (66)

4.3　微分运动与运动旋量 …… (71)

4.4　刚体变换的线矢量表示 …… (78)

4.5　螺旋运动 …… (81)

4.6　力旋量 …… (85)

4.7　线矢量、旋量与螺旋 …… (88)

习题 …… (90)
第 5 章 操作臂运动学 …… (93)
5.1 连杆参数和连杆坐标系 …… (93)
5.2 连杆变换和运动学方程 …… (97)
5.3 PUMA560 机器人运动学反解 …… (102)
5.4 指数积公式 …… (107)
5.5 运动学方程的自动生成 …… (112)
5.6 运动学反解的子问题 …… (114)
5.7 运动学的封闭解和解的存在性、唯一性 …… (120)
5.8 驱动空间、关节空间和操作空间 …… (123)
习题 …… (125)
第 6 章 操作臂的雅可比矩阵 …… (130)
6.1 引例 …… (130)
6.2 速度雅可比矩阵 …… (132)
6.3 逆雅可比矩阵和奇异性 …… (137)
6.4 操作臂的灵巧性 …… (140)
6.5 力雅可比矩阵 …… (143)
6.6 冗余度机器人 …… (148)
6.7 刚度与柔度 …… (152)
6.8 误差标定与补偿 …… (154)
习题 …… (157)
第 7 章 操作臂动力学 …… (162)
7.1 操作臂动力学概述 …… (162)
7.2 质点系与单刚体动力学 …… (163)
7.3 拉格朗日动力学 …… (168)
7.4 操作臂的拉格朗日方程 …… (171)
7.5 拉格朗日方程的其他形式 …… (175)
7.6 连杆运动的传递 …… (178)
7.7 牛顿-欧拉递推动力学方程 …… (182)
7.8 基于指数积的牛顿-欧拉方法 …… (187)
7.9 关节空间和操作空间动力学 …… (189)
7.10 动力学性能指标 …… (191)
习题 …… (194)
第 8 章 轨迹生成 …… (196)
8.1 轨迹规划的一般性问题 …… (196)
8.2 关节轨迹的插值 …… (198)
8.3 笛卡儿空间轨迹规划方法 …… (206)
8.4 利用四元数进行直线轨迹规划 …… (212)
8.5 轨迹的实时生成 …… (217)
习题 …… (219)

第 9 章　操作臂的轨迹控制 …… (221)
9.1　操作臂的单关节传递函数及 PD 控制 …… (222)
9.2　二阶线性系统控制器的分解 …… (230)
9.3　操作臂的单关节控制规律分解 …… (235)
9.4　操作臂的非线性控制 …… (236)
9.5　操作臂的多关节控制 …… (238)
9.6　基于直角坐标的控制 …… (240)
9.7　李雅普诺夫稳定性分析 …… (242)
习题 …… (245)
第 10 章　操作臂的力控制 …… (247)
10.1　概述 …… (247)
10.2　力-力矩传感器 …… (248)
10.3　约束运动与约束坐标系 …… (250)
10.4　力控制规律的分解 …… (253)
10.5　间接力控制 …… (255)
10.6　直接力控制 …… (260)
习题 …… (267)
第 11 章　协调控制 …… (268)
11.1　概述 …… (268)
11.2　双臂协调运动的约束关系 …… (268)
11.3　双臂协调的关节力矩计算 …… (273)
11.4　多指手爪的运动分析 …… (277)
11.5　抓取的稳定性和可操作性 …… (281)
11.6　多指抓取规划和协调控制 …… (283)
习题 …… (288)
第 12 章　视觉图像处理 …… (290)
12.1　图像传感器与视觉系统 …… (290)
12.2　图像几何变换与摄像机成像模型 …… (295)
12.3　空间滤波 …… (298)
12.4　频域滤波 …… (303)
12.5　图像分割 …… (306)
12.6　特征提取 …… (309)
12.7　图像匹配 …… (312)
12.8　图像拼接 …… (316)
习题 …… (319)
第 13 章　视觉运动控制 …… (321)
13.1　视觉标定 …… (321)
13.2　立体视觉 …… (325)
13.3　视觉检测 …… (331)
13.4　视觉跟踪 …… (336)

13.5 视觉伺服控制 …… (340)
习题 …… (345)
第 14 章 视觉导航定位 …… (346)
14.1 概述 …… (346)
14.2 视觉里程计 …… (350)
14.3 后端优化 …… (357)
14.4 回环检测 …… (362)
14.5 建图 …… (365)
14.6 激光雷达 SLAM …… (369)
14.7 多传感器融合 …… (374)
14.8 飞行机器人 …… (377)
习题 …… (381)
第 15 章 汽车式移动机器人 …… (382)
15.1 简介 …… (382)
15.2 运动学建模 …… (384)
15.3 机动性 …… (389)
15.4 动力学建模 …… (393)
15.5 运动控制 …… (395)
习题 …… (399)
第 16 章 运动规划 …… (401)
16.1 $\mathcal{C}$-空间 …… (401)
16.2 广义维罗尼图法 …… (405)
16.3 单元分解法与全覆盖路径规划 …… (407)
16.4 基于采样的运动规划 …… (410)
16.5 人工势力场法 …… (413)
习题 …… (416)
附录 A 符号与术语 …… (417)
附录 B 术语中英文对照 …… (421)
参考文献 …… (425)

第1章 概 述

人类在探索客观世界的同时，也在探索其自身。近年来，人类一方面加紧了南极考察、深海探测，以及登月、建立空间站、观测火星和其他星球等活动，不断致力于研究人类的生存环境，力图扩大人类的生存空间；另一方面，人类也在加速对自身的研究，探索人体功能和生命奥秘，所研究的课题包括生物工程、遗传工程、基因工程、蛋白质合成、人造心脏、器官移植和脑科学等。机器人则是人类幻想已久的与自身功能相似的机器和装置。

我国早在公元前几百年的远古时代就有关于机器人的传说。据《列子·汤问》记载，公元前九百多年前的西周时，有一位巧匠偃师，造出了“千变万化，唯意所适”的机器人。据考证，公元618至907年间，四川能工巧匠杨行廉制作的能走会动的“木僧”，江苏“神匠”马待封制作的“酒山”等都是早期的机器人。在我国广为流传的三国时期诸葛亮制作的木牛流马，是一种栩栩如生的移动机器人。在国外，公元1768至1772年间，瑞士钟表匠德罗斯父子设计制造了三种拟人的机器人：写字偶人、绘画偶人、弹琴偶人。1920年，捷克作家卡雷尔·卡佩克创作的剧本《罗莎姆万能机器人》中，塑造出了只会劳动不会思维的机器人形象，机器人开始登上舞台，“Robot”一词开始出现在英文和其他语言的词典中。

1940年，科幻作家Asimov在他的科学幻想小说《我是机器人》中，提出了机器人的三原则：

(1) 机器人不得伤害人类，也不能坐视不管人类受到伤害；

(2) 机器人必须服从人类的命令，但不能违背(1)；

(3) 机器人必须保护自己，但不能违背(1)和(2)。

上述三原则作为人工选择机器人时，长期以来所遵循的准则，值得人们在研究、设计和开发机器人过程中考虑和深思。

20世纪50年代是机器人幻想小说最盛行的时代，各种各样的机器人形象出现在荧幕上，对青少年的影响很深。但一直到电子计算机出现与发展，真正意义上的机器人新时代方开启。第一台商用工业机器人称为万能伙伴(Unimate)，于1961年问世。此后，各种工业机器人在不同应用领域蓬勃发展起来，反映出生产发展的需求和科技发展的趋势。有关机器人的学科，如人工智能、神经网络、专家系统、大数据深度学习、机器视觉、语言识别和认知科学等相继出现，与机器人发展有关的伦理道德问题，也引起了学术界热烈的讨论。

1.1 机器人的内涵

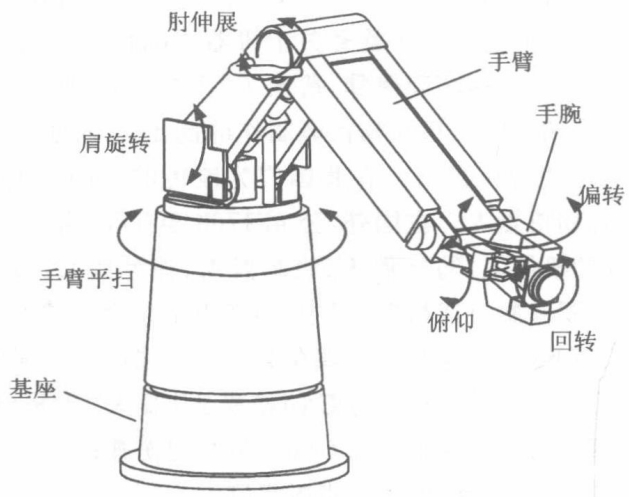
在机器人高速发展的同时，其内涵亦不断扩大。当前，机器人的内涵可以用三个词来概括：操作臂、海陆空、人机共融。操作臂代表传统工业机器人；海陆空代表无人机、智能车和水下机器人等；人机共融涵盖仿生机器人、类生机器人、拟人机器人和康复医疗机器人等。

因此,机器人集合可以定义为它的三个子集之并:

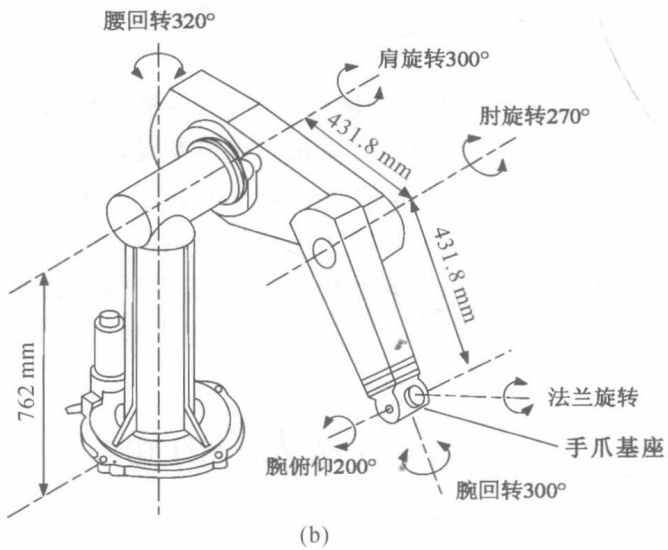
{机器人} = {操作臂} ∪ {海陆空} ∪ {人机共融}

1.1.1 操作臂

操作臂是指工业机器人,与人的手臂相似,如图 1-1 所示,是由一系列连杆和关节顺序连接而成的开式链机构。这些连杆就像人体的骨架,分别类似于胸(chest)、上臂(upper arm)和下臂(fore arm),工业机器人的各个关节分别相当于人的肩关节(shoulder)、肘关节(elbow)和腕关节(wrist)。操作臂的前端装有末端执行器(end-effector)或相应的工具(tool),也常称为手(hand)或手爪(gripper)。手爪由两个或多个手指(finger)所组成,手指可以"开"与"合",实现抓取动作(grasping)和细微操作(fine manipulation)。手臂的动作幅度一般较大,通常能实现宏操作(macro manipulation)。最初的机器人教材实际上大多是介绍机器人操作臂的。



(a)



(b)

图 1-1 两种工业机器人

(a) Cincinnati Milacron T³ 机器人 (b) PUMA560 系列机器人

最早的工业机器人 Unimate 实际上是操作臂。这是一种用于压铸作业的五自由度液压驱动的机器人操作臂，手臂的控制由一台专用的计算机完成。

从 18 世纪中叶瓦特发明蒸汽机以来，人类先后步入蒸汽时代、电气时代、数字时代，由此带来的三次工业革命促使人类文明发展达到空前的高度。工业机器人的出现和发展，使得自动化、数字化的柔性生产模式逐步取代了传统的刚性生产模式，从而对经济发展和人类社会进步产生了深远影响。

1.1.2 海陆空机器人

海陆空机器人展示出运载器具的机器人化发展前景。海——自主驾驶船舶、水下机器人(ROV、AUV 等)；陆——智能移动机器人，包括智能驾驶汽车和 AGV 等；空——智能飞行机器人，包括无人机和小卫星。显然，所有智能机器，包括智能驾驶汽车、无人机和无人水下作业潜器等，都可称为无人系统。智能手机是人机接口的重要组成部分；车联网成为重要通信传媒工具；Google 推出的无人驾驶汽车将成为新一代交通工具；波音无人机是一种以无线电遥控或由自身程序控制为主的不载人飞机，称为无人驾驶飞机(unmanned aerial vehicle)。对海陆空机器人的功能、性能提出的独特、苛刻要求，使得海陆空机器人的研究和发展面临前所未有的挑战。可以看出，机器人进入“海陆空”标志着机器人发展步入崭新阶段，这也是智能机器人向科学技术的更深、更广和更高处飞速发展的必然结果，是机器人与海陆空智能机器深度融合的体现。

首先，机器人进入海陆空，说明了舰船、轿车和飞机的网络化、无人化、智能化的发展趋势，显示出机器人的内涵在扩大。其次，机器人进入海陆空，促使机器人从制造装备变成核心产品，融入国家支柱产业——汽车、航空航天航海和电子信息产业等，说明机器人开始与这些产业深度融合，成为这些支柱产业的核心部分和提升这些产业的核心要素。

当前，机器人与汽车的深度融合已经开始，无人驾驶将是汽车工业产业新一轮转型升级的关键。先进国家都很重视机器人与汽车的深度融合带来的机遇，以智能驾驶带动汽车新能源和轻量化的研究开发，已经成为发展自主品牌的新型汽车的主流方向。汽车与机器人的纵横联合、协同创新与深度融合，将成为带动新的工业革命的强大引擎。市场调查公司 HIS 称，全世界无人驾驶汽车销售量 2025 年预计会达到 23 万台，而 2035 年将上升到 1180 万台。另外据市场调查公司 ABI 报道，部分无人驾驶汽车和完全无人驾驶汽车的销量预计将在 2024 年达到 110 万台，而到 2035 年将增长约 38 倍，上升到 4200 万台。

无人驾驶对于无人机和水下机器人同样重要，机器人与飞机、船舶舰艇的深度融合是机器人发展的另一主流方向，也是航空航天航海领域的主流发展趋势。实际上，与机器人的深度融合，可以提升这些运载器具的智能化和无人化水平，例如实现浓雾天气飞机的安全可靠起降，可带来重大的经济效益和社会效益。展望未来，机器人进入海陆空，急需解决许多关键技术问题，需要大数据、海量信息和云端信息知识的支撑，机器人不再仅是机械装置，而是与传感器融合、与信息集成的电子装置与智能装置。当前产品创新的重要任务是：让机器人与所有智能机器共融发展，共创美好未来。

1.1.3 人机共融机器人

前面的阐述表明，任何具有智能的机器都是机器人。但是，从汉语“机器人”的含义来看，仅有智能是不够的，还要为机器人注入新的生命力。在科学技术高度发展的今天，人们

对仿生、类生、拟人机器人十分重视，目的是要重建、复制和增强人的运动功能、感知功能、认知功能和思维功能等。此外，在康复医疗、器官移植和微创手术机器人等方面的应用研究、开发十分活跃。人类在探索客观世界规律性的同时，也在研究人类自身的规律性，研究人体组成、结构和功能之间的联系规律、演变规律和进化规律，研究生命起源和人类起源问题。达尔文的物种起源和进化论在历史上的贡献是无可比拟的。人类进化到今天是长期自然选择的结果，经历了漫长的进化过程和突变优选过程。自然选择所遵循的规则是“生存竞争，适者生存”。机器人的发展和进化可以视为人工选择的结果，随着科学技术的发展，人类是否能够开发出类似人类本身的机器人（仿生、类生机器人）？科学家一直在探索，破解人工选择与自然选择相融合的难题，不断研发，不断创造，不断实践。

日本机器人之父——加藤一郎很早就开始拟人机器人的研究。1969 年，他研发出第一台两足直立步行机器人；20 世纪 80 年代，又开发了两足动态步行机器人和钢琴演奏机器人等。实际上，加藤一郎的观点是将具有运动功能和感知功能的人体模型称为机器人，他提出，具备如下三个条件的机器称为机器人：① 具有脑、手、脚等三要素（躯体）；② 具有非接触传感器（用眼、耳等感知信息）和接触传感器（感知功能）；③ 具有平衡功能和定向功能（运动功能）。显然，他对机器人的定义与西方是有差别的。西方将机器人定义为具有感知功能和可编程运动功能的躯体；而加藤一郎将机器人定义为具有智能感知功能和自律运动功能的躯体。半个世纪以来，各国都在不断地探索和研究拟人机器人和仿生机器人。

“阿特拉斯”机器人是美国武器供应商——波士顿动力公司为美军研制的世界上最先进的拟人机器人，身高 1.9 m，体重 150 kg，由头部、躯干和四肢组成，可像人类一样用双腿直立行走，不仅能够行走、取物，还能够在户外穿越复杂地面，使用手脚攀爬。军事专家预测，“阿特拉斯”在未来战场上可代替士兵完成一切战斗任务，包括进攻、防护、寻找目标等，有望成为名副其实的机器人战士。近年来，美、日等发达国家热衷于研发各式各样的军用机器人，代替人类从事敌方侦察、物资运送、目标攻击和排雷排险等危险任务，如仿生机器人 Boston 大狗（Bigdog）、全球鹰无人机、X-47A 无人作战飞机、MARCbot 地雷探测机器人、SYRANO 战地机器人等都属于军用机器人。

在研究仿生机器人的同时，人们开始从事类生机器人方面的研究，例如：哈佛大学科学家研制的机器人肌肉可以模拟人体运动；有人已开始研究人造皮肤、人造虹膜；研究与响尾蛇的眼睛、果蝇的眼睛相类似的视觉系统；研究壁虎脚趾形成的吸附力。比尔·盖茨最近预测：十年内机器人将比人类更聪明。这个结论虽然有些夸张，但是，对类生机器人的研究不仅会使机器人获得更加灵活的躯体，更加敏锐的感官，而且会使其得到具备更高智商水平的“大脑”。

总之，机器人的内涵在不断扩大、延伸、拓展。人机共融展示出机器人发展的未来，预示了机器人向人类“进化”的未来前景。人机共融的意义更重大，它将成为带动新的科技革命的强大引擎。“共融”还蕴含着机器人与环境的共融、多学科的共融等。

1.2 机器人的应用与发展

当前，工业机器人最重要的应用领域是制造业，可完成的作业主要包括焊接、喷涂、装配、搬运、检测、机械磨抛加工等。机器人在汽车、电子电气、航空航天、机械制造和食品药品等行业大量使用，组成柔性自动化生产线，在保证产品质量、提高生产效率、改善劳动条件、

降低生产成本、快速响应市场等方面发挥了巨大作用。工业机器人在制造业的应用越来越广泛，其标准化、模块化、智能化和网络化的程度也越来越高。

1.2.1 工业机器人的应用

汽车及其零部件制造业依旧是工业机器人的主要应用领域，占工业机器人总需求的60%以上。工业机器人在汽车冲压、焊装、涂装、总装四大车间广泛应用，例如，大型轿车壳体冲压自动化系统技术和成套装备，大型车体焊装自动化系统技术和成套装备，电子电气等柔性自动化装配及检测技术成套装备，发动机、变速箱装配自动化系统技术成套装备及板材激光拼焊成套装备等的制造，都大量采用了工业机器人。

冲压车间可通过机器人实现自动上下料；焊装车间可通过机器人完成车身焊接；涂装车间可采用机器人进行连续喷涂，并通过机器人完成漆面色差、平滑度和膜厚的检查；总装车间可采用机器人调整和翻转工位，实现高位、低位运行，实现空间利用最大化。

工业机器人能够代替人类从事某些单调、频繁和重复的长时间作业，例如冲压、压力铸造、热处理、焊接、涂装、塑料制品成形、机械加工和简单装配等任务。

电子电气工业对工业机器人的需求仅次于汽车工业，占工业机器人总需求的10%～15%，例如SCARA机器人大量应用于电子元器件的装配作业。航空航天工业的复杂曲面零件磨抛加工等利用机器人来完成，可大大改善工人劳动条件，提高零件的加工质量。

当前，工业机器人的应用仍然是一个广阔的研发领域。由于采用运动灵活的开式链结构，具有较大的工作空间，工业机器人在汽车的点焊、弧焊、喷涂和装配等方面都显示了突出的优越性。事实上，工业领域中许多较为先进的设备，如多轴数控机床、三坐标测量机CMM、Laser Scanner、3D打印机等都是工业机器人。工程机械也是工业机器人，在日本福岛核事故中，“三一重工”的长臂机器人(62 m长泵车)完成了普通机器人不能完成的作业，在人道救援中发挥了突出作用。用于航空叶片与风电叶片的加工，以及满足真空作业环境、净化作业环境和特殊环境要求的机器人仍然值得深入研究开发。移动机器人在工业和工程建设中的应用越来越广泛，例如，工厂中广泛应用的工业机器人——自动导引车(AGV)，在重大工程中进行掘进作业的机器人盾构和隧道掘进机(TBM)。近年来，为满足高铁、地铁建设的重大需求，我国盾构和TBM的发展很快。目前，工业机器人的应用已从传统制造业逐步推广到其他行业，诸如采矿业、农业、建筑业等非制造行业。

1.2.2 服务机器人的兴起

近年来，服务机器人，包括教育和医疗康复机器人发展迅速，可以用于完成家庭服务、学校教育和健康服务等工作，例如维护保养、修理、运输、清洗、安保、救援、监护等。服务机器人包括个人/家庭服务机器人和专业服务机器人。从目前来看，专业服务机器人会率先发展起来，特别是医疗机器人和物流运输机器人。医疗机器人中的手术机器人、外骨骼机器人、个人护理机器人及康复机器人等将会得到市场的青睐。

个人/家庭服务机器人主要包括助老助残机器人、家庭作业机器人、娱乐休闲机器人、住宅安全和监视机器人等。以助老助残机器人为例，中国有两亿多老年人、八千万残疾人，我国家庭以独生子女家庭为主，根本无法通过人力承担巨大的养老助残压力，必须通过助老助残机器人及相关医疗设备配套来解决相关问题。服务机器人将要带给我们的，不仅是巨大的经济价值，更有巨大的社会价值。

经过数十年的努力，医疗机器人已开始在脑神经外科、心脏修复、胆囊摘除手术、人工关节置换、整形外科、泌尿科手术等方面广泛应用，大大提高了手术定位精度和治疗效果。第三代“达芬奇”手术机器人已投入临床使用，其共有四只手臂，一只为摄像头手臂，其他三只可灵活转换手术所要的分离器、镊子、超声刀等。其技术特点有：① 采用了高清三维立体视频技术，镜下图像可进行数字放大，超越了人眼的局限；② 精致的 EndoWrist 器械可以模拟人手腕的灵活操作，控制不必要的颤动，达到甚至超越人手的灵活度和精确度，适合在狭小的空间进行精细的手术操作；③ EndoWrist 器械支持在任何外科手术台上实现最快最精准的缝合、解剖及组织处置手术。

1.2.3 极端环境作业机器人的研发

海洋探测机器人、反恐防暴机器人、救援机器人、高空建筑机器人、核工业机器人、极地科考机器人等都属于极端环境作业机器人。

美国发表的《21 世纪战争技术》一文指出，“20 世纪地面作战的核心武器是坦克，21 世纪则很可能是军用机器人”。在未来的军队编制中，将会出现“机器人部队”和“机器人兵团”，用以代替一线作战的士兵，避免人员伤亡和流血战争。例如战术侦察机器人，身上装有侦察雷达或红外、电磁、光学、音响传感器，以及无线电和光纤通信器材，可依靠本身的机动能力自主观察和侦察，还能被空投、抛射到敌人纵深部位，选择适当位置进行侦察，并将侦察的结果及时报告给上级部门。

无人驾驶飞机是一种以无线电遥控或由自身程序控制为主的不载人飞机。它的研制成功和战场运用，揭开了以远距离攻击型智能化武器、信息化武器为主导的战争（非接触性战争）的新篇章。

一些专家预言：“未来的空战，将是具有隐身特性的无人驾驶飞行器与防空武器之间的作战。”但是，由于无人驾驶飞机还是军事研究领域的新生事物，实战经验少，各项技术不够完善，其作战应用还只局限于高空电子及照相侦察等，并未完全发挥出应有的巨大战场影响力和战斗力。因此，世界各主要军事国家都在加紧进行无人驾驶飞机的研制工作。根据实战的检验和未来作战的需要，无人驾驶飞机将在更多方面得到更快的发展。

美、德、日、韩等国已开发出智能水下机器人，用于海底油气探测、矿石搜索、海底形貌测绘、海洋污染检测等。水下机器人可用于检查大坝或桥墩结构检测、海上救助打捞、近海目标搜索等，例如：2014 年澳大利亚海事局在印度洋投放了“蓝鳍金枪鱼”自主水下航行器，用于搜寻失踪的马航 MH370 波音 777 客机；2011 年伍兹霍尔海洋研究所提供的水下机器人在 4000 平方千米海域花了几天时间便搜索到了法航失事航班的残骸。水下机器人可用于市政饮水系统中水罐、水管、水库检查，排污排涝管道、下水道和海洋江河输油管道检查，以及水环境、水下生物的观测研究等。此外，水下机器人将成为未来海洋战争中争夺信息优势、实施精确打击、完成特殊作战任务的重要设备之一。美国海军已开始研究用于潜艇侦察、鱼雷摧毁、反潜作战、水下运载、通信导航和电子干扰的水下机器人，预计其到 2020 年将拥有 1000 套水下机器人，可组建一支具备较强战斗能力的水下无人舰队。目前，国内在水下机器人方面开始进入实质性试验阶段，主要包括：哈尔滨工程大学研制的智能水下机器人 AUV，中科院沈阳自动化所研制的无人无缆水下机器人 UUV 和中船重工 715 所研制的拖曳式水下机器人 TUV 等。

1.3 机器人学的研究展望

机器人学是一门课程，也是一门新型学科，发展很快，影响深远。它是物质科学、信息科学和生命科学等交叉融合的结果，代表当代科学和技术发展的综合化趋势。维纳(Wiener)于1948年发表了 *Cybernetics: or Control and Communication in Animal and the Machine*(以下简称 *Cybernetics*)一书，开创了科学综合化新时代。钱学森(H. S. Tsien)于1954年出版了著作 *Engineering Cybernetics*，该书成为工程科学(engineering science)的范本，用于指导工程实践(engineering practice)。这两本著作对机器人学和制造科学的发展产生了深远的影响。机器人学、制造科学与其他工程科学一样，将认识世界和改造世界两者融合为一体，具有综合性、系统性、随机性和实践性等特点。时至今日，维纳的 *Cybernetics* 一书还在中国再版，作为新闻学和传播学历史上的经典名著，成为信息科学与社会科学融合交叉的典范。当前，物质科学、生命科学和信息科学的发展突飞猛进，人类在研究物质结构和运动规律、探索宇宙的形成和演变、认识信息的物质性、阐明生命的起源、解析认知的本质等方面取得了重要成果。机器人学和制造科学的形成和发展是科学技术新的里程碑，标志着科学、技术与工程三者的有机结合，是客观世界与主观世界认识的深度融合，是对规律的认识与认知的规律相互联系的开端。下面对机器人学的几个重要研究方向做简单介绍。

1.3.1 机动性和操作性

机动性(mobility)和操作(manipulation)性用于衡量机器人实现所要求的运动功能和作业的能力，涉及操作臂的可达性、奇异性，多指手的灵巧性、抓取的封闭性，步行机器人的步态、步行的稳定性，多臂协调、多指协调、手-眼协调操作和顺应控制，移动机器人的视觉伺服、多传感器集成、信息融合和环境场景的建立等，内容十分广泛。机动性和操作性，使机器人可实现在非结构环境下的自律运动，具备在突变环境下的随机应变的运动能力。在机器人的建模、控制和视觉等方面，有待研究的问题很多。汽车无人驾驶所涉及的诸多问题中，机动性是最重要的一个。例如，移动机器人的爬坡、越障、涉水、转弯的能力，步行机器人的奔跑、跳跃、避障能力，飞行机器人的翻转、起降、对接能力等，都属于机动性的范畴。运动物体非完整约束动力学建模和控制问题，运动物体轻量化问题，使所消耗的能量最少的控制问题，使加速性能提升、灵巧性增加的最优控制问题等都是与机动性有关的研究问题。精确的系统模型、多维操纵控制、敏捷多维感知等对提高移动机器人和飞行机器人等的机动性而言是不可缺少的要素。对于智能汽车的机动性研究，应该解决多目标优化问题，协调整车驱动、制动、转向、悬挂等多系统，实现智能互联和协同。

机动性是衡量机器人运动功能的重要指标，不仅与机器人的机械系统和控制系统有关，而且与机器人的感知系统有关，与机械结构的自由度、构型、尺度，以及材料的刚度、柔性和软体等也有关。最近引起广泛注意的软体机器人可以视为增强机器人机动性的新的研究方向。

1.3.2 智能驾驶与智能互联

机器人进入海陆空带来了许多科学问题，其中之一就是智能驾驶。当前急需解决的是