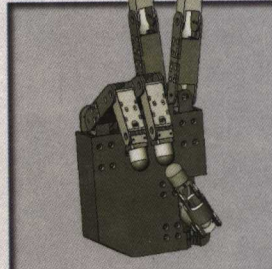
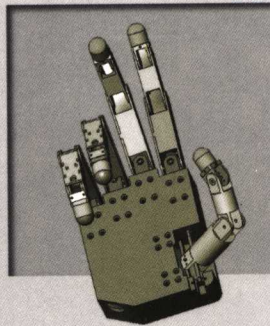
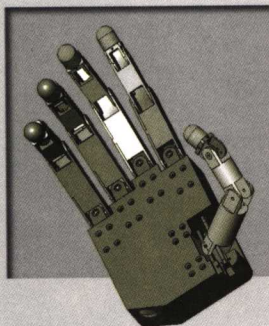
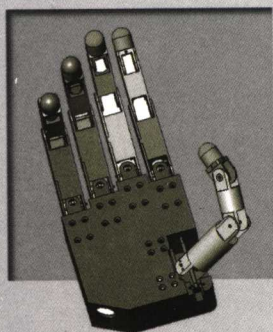




机器人灵巧手

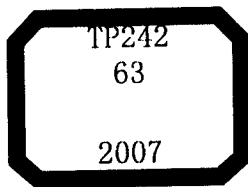
——建模、规划与仿真



张玉茹 李继婷 李剑锋 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助项目

机器人灵巧手： 建模、规划与仿真

张玉茹

李继婷

李剑锋

著



机械工业出版社

本书是国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助项目。

本书从理论和试验两方面讨论了机器人灵巧手的建模、规划与仿真问题。内容包括：灵巧手运动学、抓持力学、操作运动学、主从控制规划、示教再现规划、抓持仿真和灵巧手设计等。

本书是国内第一部详细论述机器人灵巧手理论与技术的专著。灵巧手是一个复杂的机电集成系统，其理论和应用存在差距，需要紧随技术发展而不断进步。基于这些特征，本书在写作上力求体现多样性、开放性和发展的学术观点。在介绍方法与实践的同时，通过列举参考文献让读者获得更广阔的视野。

本书可供广大从事机器人研究的大专院校师生和科研院所的科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人灵巧手：建模、规划与仿真/张玉茹，李继婷，李剑锋著. —北京：机械工业出版社，2007. 1

ISBN 978-7-111-20497-8

I. 机… II. ①张…②李…③李… III. 机器人技术
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 001353 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：沈 红 版式设计：霍永明 责任校对：申春香

封面设计：姚 毅 责任印制：杨 曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 6.75 印张 · 8 插页 · 242 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-20497-8

定价：46.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010)68326294

购书热线电话：(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

作者简介



张玉茹博士

青年骨干教师。

近年来主要研究方向为触觉人机交互技术、机器人灵巧操作和医用机器人。

北京航空航天大学教授，机械工程与自动化学院副院长。中国机械工程学会理事，IEEE 会员，ASME 会员，中国机械工程学会机械传动分会委员，中国机械工程学会机构学专业委员会委员，中国自动化学会《机器人》编委会委员，教育部教学指导委员会委员。

发表论文 100 余篇，获国家发明专利 2 项。科研成果获省部级二等奖两次、三等奖一次；教育部“跨世纪优秀人才”，中国航空工业总公司“做出突出贡献的中国博士学位获得者”，北京市青年学科带头人和优秀



李继婷博士

北京航空航天大学机器人研究所副教授，IEEE 会员。

主要研究方向为机器人运动学与动力学、机器人灵巧操作及虚拟样机等。参加国家自然科学基金、博士点基金、国家 863 和国防基础研究等多项科研项目，在国内外核心期刊和会议上发表科研论文 20 余篇，其中被《EI》收录 7 篇，ISTP 收录 1 篇。获国家专利 2 项，软件著作权登记 1 项。



李剑锋博士

北京工业大学机械工程及应用电子技术学院副教授，中国机械工程学会高级会员。较熟悉的研究方向为机器人机构学、操作算法和机械传动技术，发表相关论文 30 余篇，授权专利 4 项，软件著作权 2 项。

前 言

自从 40 多年前,第一台计算机控制的机械臂出现之日起,人类将机器概念延伸到了一个新的领域——机器人。在制造领域,可以看到众多机械臂在替代人们执行各种操作任务,如喷漆、焊接、搬运、装配等。然而,还有许多操作任务单靠机械臂的运动无法完成,例如在太空、水下、核辐射等环境下的实验、维护、排险等复杂任务。于是像人手一样的机器人成为期待的目标。然而,人类能否创造出如此灵巧的机器人呢?在机器人技术领域,研究人员一直在探索解答这一问题的技术途径。经过十几年的研究,世界一些大学和研究机构已经开发出多种机器人灵巧手样机。它们日益显示出在危险和有害环境下代替人类执行复杂操作任务的可能性。

对于怎样设计机器人灵巧手的问题,研究人员提出了两种思路。一种是模仿人手进行设计,另一种是基于分析模型和性能指标进行设计。无论是哪一种设计,在多年的探索之后,回顾其历程,我们可以获得对现在和未来都十分宝贵的启迪。

本书系统地总结和提供了我们在研究与开发机器人灵巧手过程中积累的知识 and 经验。从 1987 年开始,北京航空航天大学机器人研究所持续开展了机器人灵巧手的理论与实验研究,先后研制了 4 种灵巧手样机。即 BH-1 型为 3 指 9 自由度灵巧手,采用钢丝绳传动,驱动电动机置于手掌之外;BH-2 型改变了 3 个手指的配置,设计成拟人手;BH-3 型将 3 指的 9 个电动机全部集成于手掌,并配有关节转角和指端力传感器;BH-4 型为 4 指 16 自由度灵巧手,采用齿轮传动,电动机全部集成于手指和手掌,带关节位置传感器。以上研究分别得到国家 863 计划、国家自然科学基金和国家教育部博士点基金的支持。其中,包括 863 项目“多指多关节柔性手研究”(863-512-02-11)、“多指灵巧手的研究”(863-512-02-03)和“机器人臂和灵巧手的集成实验系统研究”(863-512-20-06);国家自然科学基金项目“多指灵巧手高级控制的高效算法与实验研究”(69385008)、“基于多传感器的臂手协调控制与自主操作研究”(69785001),以及“基于 6 维力传感器的灵巧手控制和操作规划”(59985001);国家教育部博士点基金项目“人手运动识别与灵巧手的抓持规划”(2000000605)。BH-1 型灵巧手填补了当时的国内空白,1991 年 4 月参加了国家科委主办的 863 计划五周年成果展。BH-3 型灵巧手,1994 年应邀在



IEEE 机器人学与自动化国际会议上展示。加拿大 Simon Fraser 大学和上海科技大学分别购买了 BH-3 型灵巧手用作研究平台。

本书主要内容来自我们在这一领域的研究成果。由于能够提供实际的设计、实验数据和关于系统的详细描述，本书对学习和研究机器人技术的研究生、学者和技术开发工程师是难得的参考书。灵巧手本身的特征使我们必须描述一个复杂的机电集成系统、一个紧随技术发展而不断进步的系统、一个期待新技术出现而走向理想目标的系统。

本书重点介绍我们的理论研究成果，同时通过引文做必要的补充，以便给读者一个完整的轮廓。在内容的阐述方面，力求概念清楚、问题明确，注重介绍方法和工具的有效运用。在写作方面，通过具体的实例和形象化的表达，力求达到简洁、明了、可读性强的效果。

本书首先讨论为什么研究机器人灵巧手，研究现状如何，其中的关键技术和基础理论是什么。然后，逐章详细介绍灵巧手系统的基础理论和主要技术内容。第 2 章论述灵巧手运动学，主要阐述灵巧的含义，灵巧手的运动学特征，以及如何评价灵巧性。这章内容是灵巧手结构设计的基础。第 3 章论述抓持力学，主要阐述抓持的接触模型，接触力计算，以及如何评价抓持稳定性。这章内容为选择抓持位形和控制抓持力提供依据。第 4 章论述操作运动学，主要阐述灵巧手运动与被抓持物体运动之间的关系。这章内容从运动学角度回答了灵巧手如何操作物体，即如何使被抓持物体产生期望的运动，这是实现灵巧手自主控制需要解决的基本问题。第 5 章和第 6 章论述实现抓持规划的两种主要技术途径：主从控制和示教再现。两者的共同之处是用人的动作来控制灵巧手运动。区别在于前者是实时的，即人成为控制系统的组成部分；而后者是离线的，即事先将人手的运动记录下来，之后由灵巧手控制系统自主执行任务。第 7 章介绍抓持仿真平台，阐述了平台的作用和功能。抓持规划是一个复杂的过程，借助于抓持仿真平台，可以为实现低成本、高效率的抓持规划提供手段。第 8 章介绍灵巧手设计实例，描述了灵巧手的设计过程和设计方法。第 9 章论述了灵巧手研究的发展趋势、待解决的问题，以及潜在的应用领域。

对比我们人的手与臂的分工，可以想见，机器人手的复杂程度远远超过机器臂。设计和实现这样一个系统是极富挑战性的任务。我们希望本书能够在艰难的探索之路上增添几块铺路石。也希望能和读者一道继续迎接挑战，为机器人家族增添合格的新成员，使它们在人类生活的更多方面大显身手。

从 1987 年至今，北京航空航天大学机器人所对机器人灵巧手的研究走过了近 20 年的历程，其间形成的研究成果非本书能全面概括。因此，我们在此



列出相关的学位论文，以方便读者参阅。

北京航空航天大学机器人所灵巧手研究博士学位论文

论文题目	研究生	指导教师	时间
机器人柔性手和柔性假手的研究	郭躬良	张启先	1988. 4
多指灵巧手的抓持和运动规划	杨 洋	张启先	1996. 8
多指灵巧手控制方法研究	王国庆	张启先	1996. 11
多指手操作：理论、方法和实验	管贻生	张启先 李泽湘	1998. 4
多指手的灵巧性设计及操作运动学研究	李剑锋	张启先 张玉茹	1999. 1
多指灵巧手控制研究	何永强	张启先	2002. 4
面向灵巧手的六维力传感器信息处理与控制研究	韩壮志	王田苗 张玉茹	2003. 6
基于数据手套的灵巧手抓持规划与仿真	刘 杰	张玉茹	2003. 7
机器人灵巧手的抓持规划	李继婷	张玉茹	2004. 11

北京航空航天大学机器人所灵巧手研究硕士学位论文

论文题目	研究生	指导教师	时间
多指多关节柔性手控制系统	吕春野	杨宗煦	1992. 3
多指灵巧手的运动控制	刘景华	施 旗 张启先	1994. 3
新型灵巧手与线材连铸机控制系统设计与实现	李大寨	施 旗 张启先	1995. 3
灵巧手与PUMA560 机器人臂的集成控制系统研究	朱广超	张玉茹 刘连忠	1997. 3
基于 DSP 的新型灵巧手控制器设计与研制	韩壮志	王田苗 张玉茹	1999. 3
BH-4 灵巧手的抓持规划与实现	尚喜生	郭卫东	2001. 2
双目视觉在灵巧手主从抓持中的应用研究	苏文魁	郭卫东	2004. 3
基于机器视觉的灵巧手主从抓持位形规划	郑 煜	张玉茹	2005. 3

作 者

致 谢

本书有关内容的研究,凝聚着很多曾经和现在仍然在北京航空航天大学机器人研究所工作和学习的同行们的心血,几代人近 20 年的不懈努力和执着追求,为这本书的写作奠定了深厚的基础,提供了充实的内容,在此表示深深的敬意和衷心的感谢。

已故的德高望重的张启先院士对我们出版本书的想法给予了积极肯定和大力支持,华中科技大学熊有伦院士和哈尔滨工业大学蔡鹤皋院士审阅了本书的部分初稿,并为作者申请出版基金撰写了推荐意见。几位学术前辈的鼓励和支持,进一步坚定了我们努力奉献给读者一本好书的决心。我们的同事郭卫东教授对本书的内容构架和撰写思路提出了宝贵的建议。

本书第 5 章、第 6 章中基于数据手套的灵巧手抓持规划和第 7 章主从抓持仿真平台建立的内容,主要来自刘杰博士的博士学位论文;博士研究生刘博和已毕业的硕士研究生李久振参与了第 8 章关于 BH985 灵巧手的设计研究工作和部分写作,硕士研究生任大伟参与了第 5 章关于机器视觉部分研究工作。此外,在本书的编写过程中我们还得到了许多学生的帮助,任大伟、常立和张继生搜集了大量的文献资料,完成了部分插图的修改工作,提供了部分实验结果和数据。

本书的出版工作得到了国家自然科学基金研究成果专著出版基金(50224006)的大力资助,在此表示诚挚的感谢。

最后,感谢在本书的撰写过程中给予我们启发的所有人。同时我们热切期望这本专著的读者对本书提出宝贵意见。

作 者

纪念张启先院士



在本书筹划工作期间，主要发起者之一张启先院士因病不幸去世。我们感到万分悲恸和惋惜。经过 5 年的不懈努力，此书终于出版了。但我们深知，本书所达到的水平距张先生的期望和设想仍有很大差距。他的学术造诣和视野我们难以企及。尽管如此，我们仍然感到一丝欣慰，张先生的遗愿终于得以实现。

张启先院士是我国机械科学家、教育家，先后在厦门大学、清华大学、北京航空航天大学任教，生前是北京航空航天大学教授。他为我国机构学和机器人技术领域的科学研究和人才培养做出了巨大贡献，他的著名专著《空间机构的分析与综合》成为我国空间机构的奠基性研究成果，被同行引为机构学经典。他开拓了我国机器人技术领域多项前瞻性研究，培养了大批优秀人才。在他培养的 44 名博士和博士后中，已有 15 人成长为博士生导师，其中，不乏长江学者、国家杰出青年基金获得者。他的学生中既有国家 863 计

划先进制造技术领域专家组、机器人技术主题专家组、航天航空领域遥科学与空间机器人主题专家组的多位成员，也有在工业界非常成功和颇具影响力的企业领导人。

1958 年张先生受国家选派，赴苏联列宁格勒工学院，从事当时尚属国内空白的空间连杆机构理论研究。经过 3 年刻苦钻研，他完成了题为《用分析法作空间机构的分析和设计》的学位论文，创造性地提出了空间机构设计的系统方法，经 5 位同行知名专家评审，在 50 多位委员参加的答辩会上，他以出色的研究成果同时通过了副博士和博士学位答辩。

1962 年夏张先生从苏联学成回国，壮志满怀，决心在已有成果的基础上，发展形成富有特色的空间连杆机构理论体系。1978 年科技和教育事业的春天到来。张先生基于自己对国际机构学发展动向的了解，意识到我国传统机构学的研究范畴必须有所突破。他以敏锐的眼光和无畏的勇气开始将主攻方向转向机器人机构学，开展了机器人技术跨学科研究。他敏感地预见到跟踪机器人学这项发达国家领先的高新技术，不仅具有重要的理论意义，而且对促进学科的建设与发展、培养高级技术人才具有重要的现实意义。当时，在机器人理论及应用科学方面，中国已经远远落后于世界先进水平。面对这一严峻的现实，张先生认为：与国外先进水平相比，我们是落后了，但我们不能妄自菲薄、甘居落后，一定要坚定信心、奋力拼搏，赶超世界先进水平。

从事机器人技术研究离不开理论基础和实验环境，需要有足够的经费支持。这对于科研物质基础薄弱的原北航机械原理教研室无疑是一个严峻的挑战。张先生规划了从无到有，从小到大地开展机器人技术研究的战略途径。利用首批机械学博士点的优势，首先从理论上突破，出高水平成果，出优秀人才，使北航机械学赢得了全国重点学科之一的荣誉，同时也奠定了北航机器人技术发展的理论基础。之后，他抓住国家发展高技术研究的契机，领导创建了北航机器人研究所、“机械学与机器人机构”国家级专业实验室，在多项国家攻关、国家自然科学基金和 863 计划项目支持下，取得了 7 自由度冗余度机器人、机器人灵巧手等一批技术一流的科研成果，填补了国内在此方面的空白。此外，他还在国内外学术刊物和学术会议发表高水平学术论文 150 余篇，获国家发明专利多项，先后荣获教育部科技进步一等奖、国家自然科学基金四等奖，并 4 次荣获中国航空工业总公司和北京市科技进步二等奖。在他的领导下，北航机器人研究所硕果累累、人才济济，成为我国机器人学研究领域的一个主要基地。

1996 年，张启先院士为了学科的长远发展，培养学术梯队和造就更多的学科带头人，主动辞去了北航机器人研究所所长的职务。他 70 余岁高龄，仍





兼任全国博士后管委会技术科学专家组成员、重庆大学机构传动国家重点实验室学术委员会主任、中国科学院机器人学开放实验室学术委员、《机械工程学报》主任编委和《机器人》杂志编委等职务，面对如此繁重的科研工作和社会活动，他任劳任怨、鞠躬尽瘁。

2002年3月23日，张启先院士因突发性白血病而住院。病重期间，他忍受着巨大痛楚，依旧保持着独立、坚强、乐观的态度，凡事坚持自己做，积极配合医生与病魔做斗争，表现出顽强的毅力。医生及所有身边的人无不被他的精神所感动。病情稍有好转，他便坚持与学生讨论学术问题，询问科研工作进展，关心学生的学业和生活，直至生命的最后一息。

“一个获得成功的人，从他的同胞那里所取得的，总是无可比拟地超过他对他们所做的贡献。然而看一个人的价值，应当看他贡献什么，而不应当看他取得什么。”（爱因斯坦）这正是我们在张先生身上所感受到的境界。他对学生的影响如同杜甫诗中的春雨：随风潜入夜，润物细无声。我们不曾听到他的豪言壮语，却时刻感受到他的深刻力量。这一切来自于他高尚的品格，敏锐的目光和严谨求实的作风。他是一个勇于探索、热爱学习、严格自律而又淡泊名利的人。“用虚怀若谷来评价他的胸怀是十分恰当的”。这是学生们对他的由衷敬佩和赞许。

爱因斯坦曾经说过：“学校的目标应当是培养有独立行动和独立思考的一个人，不过他们要把为社会服务看作是自己人生的最高目的。”好的教师不仅给学生以知识和方法，更要给他们广阔的视野。张先生正是这样一位善于培养学生的独立行动和独立思考能力，并且给他们广阔视野的大师。他把我们引入跨学科的前沿研究领域，使我们有机会面对复杂问题的挑战。他鼓励学生自由创新，为我们营造了广阔的发展空间。能成为他的学生是我们终生的幸事。

作为教师，我们肩负着为国家培养人才的使命。如何完成这样的使命，张先生为我们做出了典范。他是我们永远的老师。

张先生离开我们已有4年了，但他的音容笑貌时常浮现在我们的眼前，他生前的谆谆教诲是鞭策我们不断上进的动力。

作者

2007年3月

目 录

前言

致谢

纪念张启先院士

第1章 概论	1
1.1 什么是灵巧手	1
1.2 研究历程	2
1.3 关键技术	7
1.4 基础理论	10
参考文献	12
第2章 灵巧手运动学	17
2.1 灵巧性	17
2.2 最小指数与最少关节	18
2.3 指尖运动与关节运动	20
2.4 物体速度与关节速度	29
2.5 灵巧性度量	31
参考文献	35
第3章 抓持力学	36
3.1 接触约束	36
3.2 力平衡方程	38
3.3 运动学方程	39
3.4 抓持分类	39
3.5 接触力计算	43
3.6 抓持性能评价	53
3.7 抓持力优化	61
参考文献	69
附录3A 力螺旋与速度螺旋	72
附录3B 形封闭与力封闭	72

第4章 多指手的操作运动学	73
4.1 抓持的运动学性质	73
4.2 运动学方程通解及系统活动性分析	80
4.3 滚动接触运动方程	91
4.4 滚动操作运动学及其算法	94
参考文献	106
第5章 主从控制规划	108
5.1 规划策略	108
5.2 人手运动采集	110
5.3 运动映射	120
5.4 结论与展望	133
参考文献	133
第6章 示教再现规划	135
6.1 规划策略	135
6.2 人手抓持分类	136
6.3 抓持类型识别	136
6.4 精度抓持规划	160
6.5 结论与展望	171
参考文献	171
第7章 主从抓持仿真平台	174
7.1 仿真系统结构及功能	174
7.2 虚拟抓持	176
7.3 虚拟抓持实验	185
7.4 结论和展望	186
参考文献	187
第8章 灵巧手设计	188
8.1 设计目标	188
8.2 总体方案与布局	189
8.3 手指机构设计	190
8.4 驱动设计	192
8.5 传动与结构设计	193
8.6 操作性能分析	201

8.7 抓持能力验证	204
参考文献	206
第9章 未来展望	207
9.1 发展趋势	207
9.2 研究课题	209
9.3 走向应用	211
参考文献	212

第1章 概 论

1.1 什么是灵巧手

今天我们所看到的工业机器人多数由机械臂 (manipulator) 和末端执行器 (end-effector) 组成, 如图 1-1 所示。机械臂和末端执行器的分工有些类似人的臂与手的分工, 前者主要提供大范围的运动和定位, 后者与环境 and 对象作用, 执行预期的任务。工业机器人的末端执行器种类繁多, 依用途而异。例如: 用于焊接的焊枪、搬运的真空吸盘、装配的夹持器等。本书讨论的对象是一种特殊的末端执行器, 在目前的工业机器人上难以见到。它的外形类似于人手, 功能多样, 既能进行各种常见操作, 又能稳定抓持形状各异的物体。

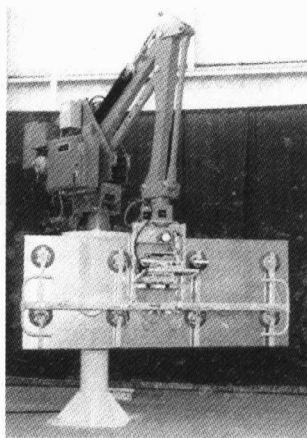


图 1-1 机械臂和末端执行器

注: 本图取自参考文献 [1]。

实现最简单的抓持功能, 至少需要两个手指和一个自由度, 如图 1-2 所示, 电动机驱动两指张合, 实现夹持。这种两指夹持器 (gripper) 常见于执行上下料或装配作业的工业机器人^[2]。为了达到稳定抓持的目的, 手指需要根据物体的形状进行设计, 因此其适应对象的范围极其有限。如果要改变被抓持物体的姿态, 或改变抓持点, 必须释放物体, 重新抓持。然而, 人手不借助重新抓持, 也可以改变物体姿态。这种操作能力正是人手的灵巧特征。实现简单的操作功能至少需要 3 个手指和 9 个自由度^[3]。因此, 本书讨论的对象是自由度不少于 9、指数不小于 3 的机械手, 我们称其为灵巧手。

灵巧手是为多任务而研究开发的一种智能型通用机械手, 其潜在的用途包括在极限或有害环境下替代人类执行任务。例如: 在太空、水下及核辐射环境, 人类借助于机器人可以有效地从事科研、生产等活动。这时机器人面对的操作对象和任务多种多样, 简单的夹持器无法满足要求。

另外, 在服务、娱乐领域, 人形机器人 (humanoid robot) 越来越受到关

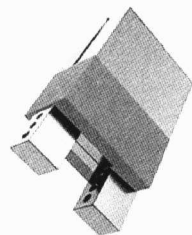
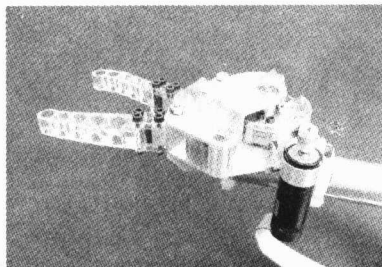
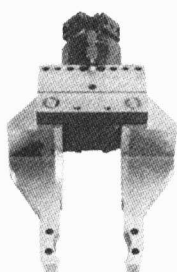


图 1-2 各种两指夹持器

注：本图取自参考文献 [4, 5, 6]。

注（图 1-3）。作为其组成部分，能够集成于人形机器人系统的拟人灵巧手，成为一个新的研究和开发课题。

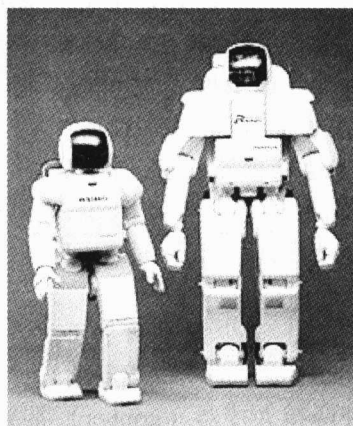


图 1-3 人形机器人

注：本图取自参考文献 [7]。

1.2 研究历程

像人一样，机器人需要用它的手与环境发生作用。机器人发展初期，面向的需求首先来自制造领域，早期工业机器人主要执行上下料这样的简单任务，功能单一的两指夹持器便能满足任务要求。随着技术的进步，工业机器人开始向更多的应用领域发展，上百种专门用途的“手”，统称为末端执行器，使机器人能够应对丰富多样的任务对象，从轮胎、玻璃到布料，从大型金属热轧件到微小电子器件^[8]。尽管如此，末端执行器仍然是制约机器人应