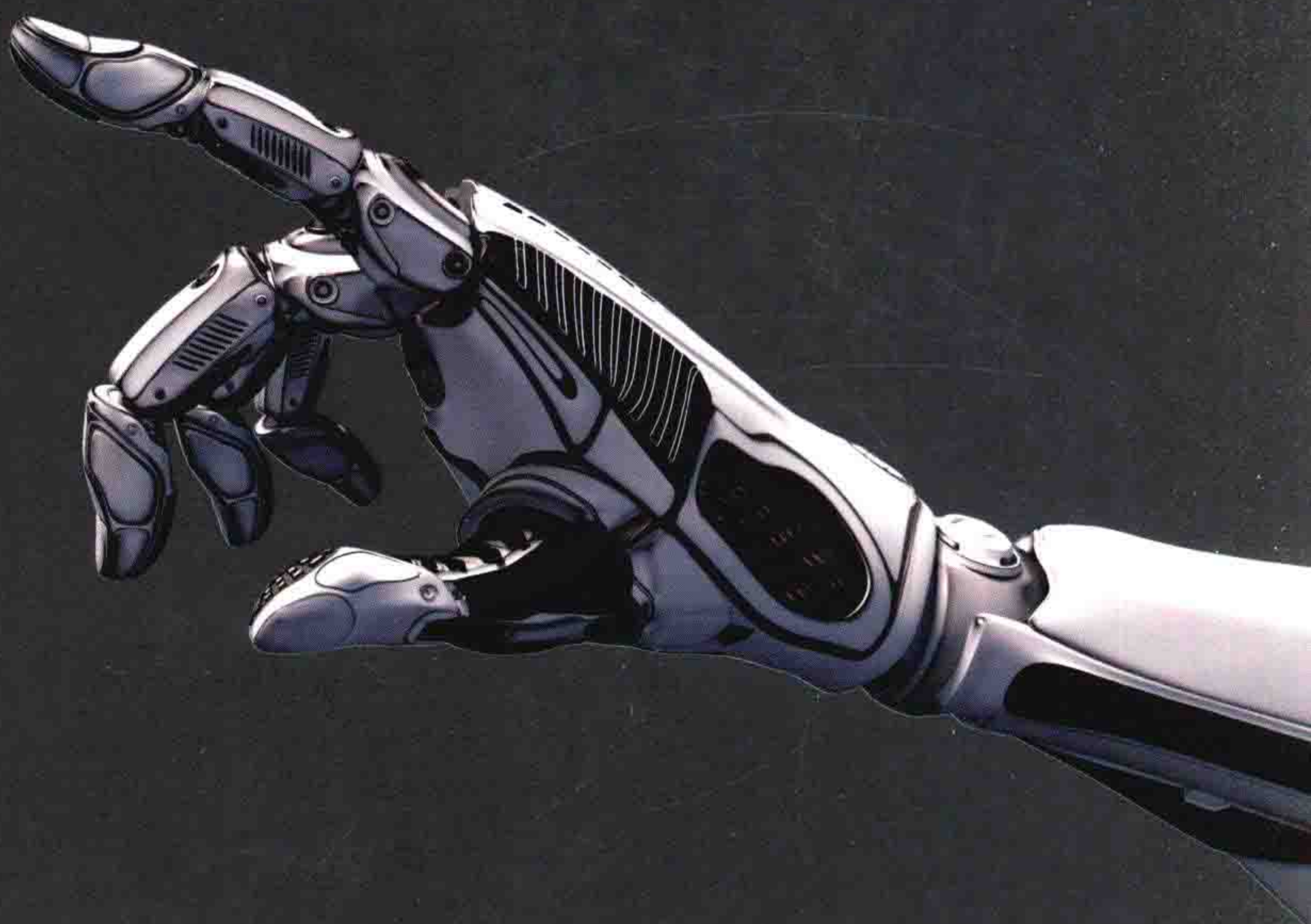




机器人学译丛

Springer



[美] 顾友谅 (Edward Y. L. Gu) 著

张永德 赵燕江 姜金刚 杜海艳 译

机器人与数字人

基于MATLAB的建模与控制

A JOURNEY FROM
ROBOT TO
DIGITAL HUMAN

MATHEMATICAL PRINCIPLES AND
APPLICATIONS WITH MATLAB
PROGRAMMING



机械工业出版社
China Machine Press

机器人学译丛

[美] 顾友谅 (Edward Y. L. Gu) 著

张永德 赵燕江 姜金刚 杜海艳 译

机器人与数字人

基于MATLAB的建模与控制

A JOURNEY FROM
ROBOT TO
DIGITAL HUMAN

MATHEMATICAL PRINCIPLES AND
APPLICATIONS WITH MATLAB
PROGRAMMING



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人与数字人：基于 MATLAB 的建模与控制 / (美) 顾友谅 (Edward Y. L. Gu) 著；张永德等译. —北京：机械工业出版社，2017.4

(机器人学译丛)

书名原文：A Journey from Robot to Digital Human: Mathematical Principles and Applications with MATLAB Programming

ISBN 978-7-111-56554-3

I. 机… II. ①顾… ②张… III. 机器人控制—系统建模—Matlab 软件 IV. ①TP24
②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 072918 号

本书版权登记号：图字：01-2015-5218

Translation from the English language edition: A Journey from Robot to Digital Human: Mathematical Principles and Applications with MATLAB Programming by Edward Y. L. Gu.

Copyright © 2013 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Springer-Verlag New York, Inc. is a part of Springer Science+ Business Media.

All rights reserved.

本书中文简体字版由 Springer Science+ Business Media 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书提供了一系列多元且实用的工具，可用于复杂机器人系统的建模和控制，以及数字人的建模和运动生成。书中首先介绍机器人运动学的数学原理和控制系统设计，然后将机器人算法和建模过程向更高维度、更大规模和更复杂的研究领域——数字人建模——推进。全书包含大量 MATLAB 代码和可视化图形示例，读者可跟随讲解内容在 MATLAB 中创建 3D 机器人模型和数字人模型，并通过实时动画操作模型。

本书适合机器人相关工程专业的高年级本科生和研究生学习，同时也可作为机器人和数字人研发者及工程师的参考指南。

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：曲 熠

责任校对：殷 虹

印 刷：北京瑞德印刷有限公司

版 次：2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：25.25

书 号：ISBN 978-7-111-56554-3

定 价：119.00 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) 88378991 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzsj@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

机器人技术及其应用目前已经从传统的工业自动化领域发展到国民经济的各个领域、各行各业，最近几年，医疗机器人、康复机器人、仿人机器人、运动机器人等更是得到了迅猛的发展。这些机器人都与人体本身密切相关，是机器人学与医学、生物学、仿生学等学科的进一步融合，并将彻底改变人们的日常生活模式。数字人是生命科学和信息科学研究中的一个崭新领域，数字人建模涵盖从几何形态到人体物理特性、生理特性的各个方面。从单一的可视化模型到具有知识表示的符号模型，最后建立可精确仿真、计算和控制的数字模型，目前还面临着很多难题。由于机器人研究相对成熟，因此本书借用了机器人的建模理论和运动算法来实现数字人建模和运动算法，是一个大胆的尝试和突破。

本书是美国奥克兰大学 Edward Y. L. Gu 教授在机器人学以及数字人建模技术方面多年的研究和教学工作的总结。本书除了机器人运动学、静力学、动力学和控制的理论基础之外，还特别对基本的数字建模过程、运动算法以及优化方法进行了介绍。Gu 教授根据机器人学和数字人建模技术的特点，将理论分析和实际应用密切结合，对 MATLAB 编程的数学基础、刚体运动表示的原理和定义、机器人运动学和静力学的原理、冗余机器人和混联机器人系统、机器人手臂的数字样机、机器人动力学的建模和表示以及机器人控制系统进行了详尽的描述，在此基础上对数字人三维运动、动力学和交互式控制进行了描述和分析。本书语言精练，内容深入浅出，实例简单易懂，无丝毫玄虚造作，体现出 Gu 教授在机器人学和数字人建模领域高深的造诣和扎实朴素的作风。本书是将机器人分析和数字人建模有机融合的经典之作。

本书第 2、3、4、8 章由哈尔滨理工大学张永德翻译，第 5、6、7 章由哈尔滨理工大学赵燕江翻译，第 1、9、10 章由哈尔滨理工大学姜金刚翻译，第 11 章由哈尔滨理工大学杜海艳翻译。全书由张永德、赵燕江和姜金刚校对整理，张永德统稿。哈尔滨理工大学博士研究生梁艺、毕津滔、赫天华、贾小红、张为玺也参与了大量的翻译和整理工作。本书可作为 MATLAB 编程、机器人运动分析、数字人建模等相关领域的研究参考用书，也可以作为机械电子工程、生物医学工程和相关专业的研究生和高年级本科生的教材。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺漏和不足之处，恳请读者批评指正！

译者

2017 年 4 月

前言

A Journey from Robot to Digital Human: Mathematical Principles and Applications with MATLAB Programming

本书可以作为工科高年级本科生和研究生拓展数字人建模和 MATLAB 编程的机器人教材，也可以作为研究人员、科学家和工程师学习和了解机器人系统的基本原理以及数字人建模和运动生成的基本方法的参考书。在过去的十年里，我编写了两部讲义（每年更新）：《机器人运动学、动力学与控制》，以及《现代非线性系统与控制理论》。在奥克兰大学工程和计算机科学学院的机器人课程、研究生非线性控制系统课程中，我将这些讲义作为教材，教学效果很棒。本书的第一部分就是这两部讲义的系统整合，并且进一步扩充了更多主题、理论和应用，以及更多的实例和 MATLAB 程序。

21 世纪初，我曾经连续 12 年受邀作为克莱斯勒公司“先进制造工程夏季培训班”的实习教授。在汽车制造公司的工作经历为我积累了很多实际生产知识和经验，这些是在课堂中无法获得的。在十多年的实习过程和顾问工作当中，我亲自参与到他们的虚拟装配和产品创新的开发设计当中，并且很快成为一些主要仿真软件方面的专家，从 IGRIP 机器人建模和 Deneb Robotics（现在是 Dassault/Delmia）的早期产品，到 CATIA 的 Safework 人体模型。由于这些极为难得的机会，我真正开始了从机器人到数字人的研究。

因此，将机器人分析和数字人建模融合到一本书当中，与读者分享我愉快的研究经历和成果，是我一直以来的想法。另一方面，尽管在很多情况下数字人建模可以借用机器人的建模理论和运动生成算法，但是将这两个快速发展的研究领域集成在一起的确不是一件简单的事情。

本书中，几乎每一章都有习题或者计算机仿真实践，这对学生加强对每一个概念和算法的理解大有裨益。教师可根据需要，选择本书的部分章节作为一学期的机器人学课程内容。另外，强烈建议教师安排学生依据本书中介绍的基本方法和说明，在 MATLAB 中写一段程序、绘制一种机器人或人体模型，并进行实际运动控制练习。

感谢在本书的完成过程中为我提供多方面知识、经验、数据和编程技巧的人。首先，特别感谢我在克莱斯勒汽车公司先进制造工程项目工作时的前任总经理 Leo Oriet 博士以及虚拟装配和产品设计组的负责人 Yu Teng。他们不仅为我提供了一个难得的机会，让我从事数字化的机器人系统、人体工程学建模以及产品设计验证和审核工作，而且近年来他们也一直在给予我支持和鼓励。还要感谢通用动力公司陆地系统部门的 Michael Hicks 工程师，以及帮我修改、润色本书的奥克兰大学英语专业研究生 Ashley Liening。

此外，感谢发那科机器人公司、机器人研究公司和法国巴黎的阿德巴兰机器人公司的友好授权，允许我在本书中引用他们的照片。

Edward Y. L. Gu
guy@oakland.edu
密歇根州罗彻斯特
2013 年 4 月

译者序			
前言			
第 1 章 机器人和数字人建模概述	1		
1.1 机器人的发展历程：过去、现在和未来	1		
1.2 数字人建模：历史、成就和新挑战	5		
1.3 借助机器人分析方法进行数字人建模	7		
参考文献	8		
第 2 章 数学基础	10		
2.1 向量、坐标变换和空间描述	10		
2.2 李群和李代数	13		
2.3 指数映射和 k - ϕ 过程	15		
2.4 对偶数、对偶向量及代数形式	19		
2.4.1 对偶环微积分	21		
2.4.2 对偶向量和对偶矩阵	23		
2.4.3 单位旋量和特殊正交对偶矩阵	25		
2.5 外代数简介	27		
习题	29		
参考文献	31		
第 3 章 刚体运动的表示	32		
3.1 平移和旋转	32		
3.2 线速度和角速度	38		
3.3 位置和方向的统一表示	42		
3.4 切空间和雅可比矩阵变换	48		
习题	52		
参考文献	54		
第 4 章 机器人运动学和静力学	55		
4.1 D-H 法	55	4.2 刚体运动的齐次变换	57
		4.3 运动学反解	62
		4.4 雅可比矩阵和微分运动	68
		4.5 对偶变换	73
		4.6 机器人静力学	77
		4.7 计算机仿真实践	85
		4.7.1 斯坦福机器人运动	85
		4.7.2 工业机器人模型及其运动	86
		习题	87
		参考文献	90
		第 5 章 冗余机器人和混联机器人系统	91
		5.1 广义逆矩阵	91
		5.2 冗余机器人	93
		5.3 混联机器人系统	105
		5.4 并联机构的运动学建模	110
		5.4.1 Stewart 平台	110
		5.4.2 雅可比方程和对偶原理	117
		5.4.3 3+3 自由度混联机器人手臂建模和分析	124
		5.5 计算机仿真实践	132
		习题	134
		参考文献	136
		第 6 章 机器人手臂数字样机和 3D 动画	138
		6.1 MATLAB 中的基本曲面绘制和数据结构	138
		6.2 机器人手臂的数字化建模和装配	145
		6.3 运动规划和 3D 动画	149
		习题	152
		参考文献	153

第7章 机器人动力学：建模和方程 154

- 7.1 机器人动力学的几何解释 154
- 7.2 牛顿-欧拉算法 157
- 7.3 拉格朗日方程 162
- 7.4 惯性矩阵的确定 163
- 7.5 位形流形和等距嵌入 171
 - 7.5.1 度量分解和流形嵌入 172
 - 7.5.2 位形流形的等距嵌入 178
 - 7.5.3 组合等距嵌入和结构矩阵 ... 180
 - 7.5.4 最小等距嵌入和等距化 ... 181
- 7.6 简洁动力学方程 191
- 习题 193
- 参考文献 193

第8章 机器人系统控制 196

- 8.1 路径规划和轨迹跟踪 196
- 8.2 独立关节伺服控制 199
- 8.3 输入/输出映射和系统可逆性 ... 203
 - 8.3.1 输入/输出映射和相对度的概念 203
 - 8.3.2 系统的可逆性及应用 207
- 8.4 精确线性化和可线性化理论 ... 208
 - 8.4.1 对合性和完全可积性 209
 - 8.4.2 输入状态线性化过程 210
 - 8.4.3 输入/输出线性化过程 213
 - 8.4.4 输入/输出通道的动态扩展 217
 - 8.4.5 线性子系统和内部动态 ... 220
 - 8.4.6 零动态和最小相位系统 ... 222
- 8.5 机器人系统动态控制 232
 - 8.5.1 李雅普诺夫稳定性理论 ... 233
 - 8.5.2 设定点稳定性和轨迹跟踪控制策略 237
- 8.6 多级联系统反推控制器设计 ... 239
 - 8.6.1 李雅普诺夫直接法控制器设计 239
 - 8.6.2 反推递推法控制器设计 ... 242
- 8.7 机器人自适应控制系统 248
- 8.8 计算机仿真实践 260

- 8.8.1 3 关节类斯坦福机器人手臂动力学建模和控制 260
- 8.8.2 欠驱动机器人系统建模和控制 261
- 8.8.3 并联机器人动力学建模和控制 262
- 习题 263
- 参考文献 266

第9章 数字人建模：运动学和静力学 268

- 9.1 局部与全局运动学模型和运动类型 268
- 9.2 五点模型的局部和全局雅可比矩阵 280
- 9.3 运动范围和力的范围 284
 - 9.3.1 人体结构体系基本概念 ... 284
 - 9.3.2 人体运动系统概述 285
 - 9.3.3 运动范围和关节舒适区 ... 287
 - 9.3.4 关节力的范围 289
- 9.4 数字人静力学 293
 - 9.4.1 关节力矩分布和平衡法则 ... 293
 - 9.4.2 由重力产生的关节力矩分布 300
- 9.5 姿态优化准则 304
 - 9.5.1 关节舒适准则 305
 - 9.5.2 对接关节力矩分布准则 ... 305
 - 9.5.3 最小做功的目标 312
- 习题 312
- 参考文献 313

第10章 数字人建模：三维实体模型和运动生成 315

- 10.1 利用 MATLAB 建立人体模型 315
- 10.2 手部模型和数字传感 325
- 10.3 运动规划和定量描述 334
- 10.4 人体基本运动分析：行走、奔跑和跳跃 342
- 10.5 数字人现实运动生成 344

习题	358	11.5 车辆主动系统的动态交互式	
参考文献	358	控制	376
第 11 章 数字人建模：动力学和		11.5.1 车辆主动约束系统建模和	
交互式控制	360	控制	377
11.1 动力学模型、算法及实现	360	11.5.2 主动悬挂系统模型和人机	
11.2 δ 力激励和步态动力学	364	交互控制	383
11.3 模拟汽车碰撞中的数字人		11.6 数字人建模展望	384
动力学运动	366	习题	386
11.4 简易爆炸装置中的人体模型		参考文献	386
动力学建模和分析	372	索引	388

机器人和数字人建模概述

1.1 机器人的发展历程：过去、现在和未来

近半个世纪以来，机器人研究和技术开发不断发展进步。机器人的发展历史主要分为三个时期：早期、中期和近期。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。”

与过去这种从专业角度的定义不同，现在通常认为机器人是一种在物理结构、智能甚至个性方面模仿人类的可控系统。在早期，人们经常通过所谓的遥控机械手远程搬运材料或在工业应用中做一些简单的任务。不久，遥控机械手和计算机数控(CNC)铣床“共结连理”并“孕育”出了机器人，如图 1-1 所示。

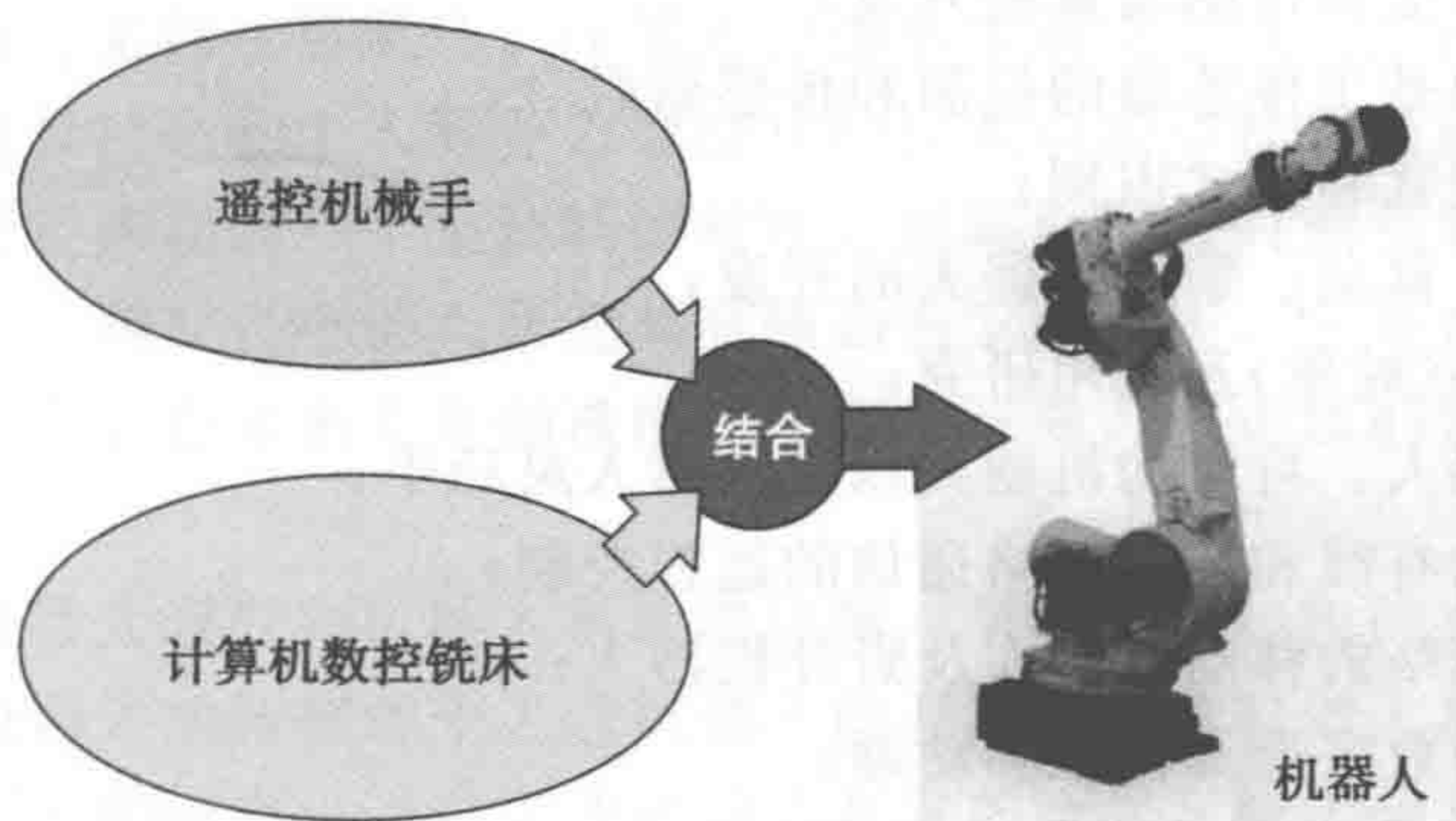


图 1-1 机器人的诞生

此后，机器人在工业和科研实验室中逐渐流行。在机器人早期发展历程中，按时间前后排序的重大事件如下：

- 1947——研制了第一台伺服电动遥控机械手；
- 1948——研制了力反馈遥控机械手；
- 1949——开始研究数控铣床；
- 1954——乔治·德沃尔设计了第一台可编程机器人；
- 1956——约瑟夫·恩格伯格(英)购买了尤尼梅申公司并生产尤尼梅特机器人；
- 1961——第一台尤尼梅特机器人投入通用汽车公司工厂使用，用于压模铸造；
- 1961——研制了第一台力反馈机器人；
- 1963——研制了第一套机器人视觉系统；
- 1971——斯坦福大学研制了斯坦福机械手臂；
- 1973——斯坦福大学开发了第一套机器人编程语言(WAVE)；
- 1974——辛辛那提·米拉克隆公司推出计算机控制的 T3 机器人；
- 1975——尤尼梅申公司登记了它的首次财务收益；

1976——德雷珀实验室研制了 RCC(远距离中心柔顺装置)用于零件装配;

1978——在美国通用汽车公司研究的基础上,尤尼梅申公司推出 PUMA 机器人;

1979——日本推出 SCARA 机器人;

1981——卡内基-梅隆大学研制了第一台直接驱动机器人。

这些历史性和革命性的事件是令人难忘的,几乎每一本机器人教科书都认可并记录了工业机器人早期发展的辉煌年代^[1, 2, 3]。经过了机器人早期发展之后,从 1982 年到 1996 年是机器人中期发展时代,各种新型的机器人系统及其运动学、动力学和控制算法被发明并广泛应用,而且增长速度几乎是指数级的。机器人研究的重要发现和成果可以通过以下典型方面来概括:

- 牛顿欧拉逆动力学算法;
- 冗余机器人及其应用的广泛研究;
- 多机器人协调系统和机器人群组全局控制的研究;
- 具有柔性连杆或柔性关节机器人的控制;
- 欠驱动和浮动基机器人系统研究;
- 并联机器人和串联机器人研究;
- 机器人系统智能控制和学习控制;
- 高级力控制算法和传感装置的开发;
- 机器人系统中基于传感器的控制和传感器融合;
- 机器人实时视觉和模式识别;
- 步行、跳跃、移动、攀爬机器人的开发;
- 超冗余机器人(蛇形)及应用研究;
- 多操作臂机器人、可重构机器人以及机器人灵巧手;
- 机器人集群的有线和无线网络通信的远程控制;
- 具有传感器网络的移动机器人及野外机器人;
- 机器人系统的数字逼真模拟和动画;
- 仿生机器人和微型/纳米机器人研究;
- 类人机器人研究和开发;
- 安卓机器人的开发和智能控制,等等。

1996 年之后,机器人的研究进入成熟期。相对于早期时代,近期机器人的应用取得了飞速发展,机器人技术的应用不断从工业快速扩展到许多不同领域,如军事、空间探索、地下和水下操作、医疗手术以及个人服务和国土安全。近几十年来,为了满足各种各样应用的挑战,机器人系统设计和控制已经进一步发展到新的高度,其具体表现在结构的柔性、灵巧性、可控性、可重构性、可扩展性、可操作性、控制精度、环境适应性以及智能程度^[4-8]。在大量互联网网站报道中,人们可以看到这种快速且不断发展的强劲势头。图 1-2 展示了发那科新研发的一台 M-900iB/700 超级

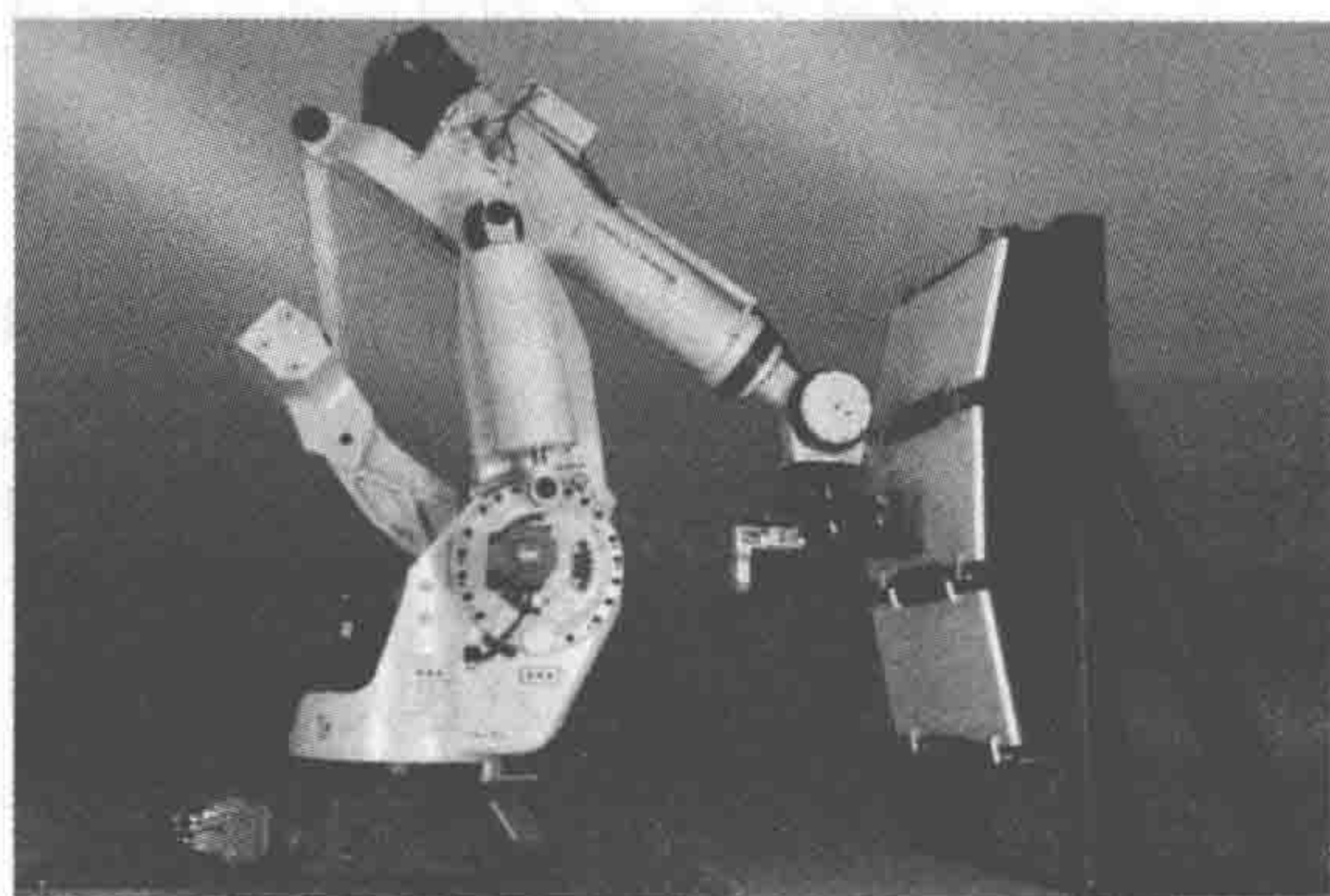


图 1-2 发那科 M-900iB/700 钻孔作业工业机器人。图片来自发那科机器人有限公司

重型工业机器人，它能够提供 700kg 额定载重量，具有内置 iRVision 视觉和力觉集成系统。

与机器人的研究和技术开发并行的虚拟机器人仿真研究也有着悠久的探索历程。在 20 世纪 80 年代中期，直到今天一直以达索-Delmia 闻名于世的 Deneb 机器人公司，公布了他们早期版本的机器人图形仿真软件包 IGRIP。与此同时，西门子 Technomatix(目前的 Technomatix-UGS)推出了 ROBOCAD 产品，拉开了竞争的序幕。虽然大多数机器人模拟软件能给用户带来丰富多彩的 3D 可视化和逼真的感受，但由于参数的不稳定性，其内部仿真算法不能精确地预测到达位置和周期时间。因此，为了提高预测的准确性，软件公司和机器人制造商共同努力创建了一个机器人仿真的规范(RRS)。

在 20 世纪 90 年代中期，机器人仿真技术走向成熟。机器人仿真的能力也被应用到产品生命周期管理(PLM)^[13, 14]中。机器人手臂、固定装置以及工作单元的图像仿真研究不仅规模越来越大，还具有更强的能力，可以管理从概念设计到样机研究，再到生产的产品设计和制造工艺。如今，机器人仿真技术已经进一步发展到更加复杂、综合的新阶段。它已经变成设计团队和顾客沟通设计问题的通用语言，也是产品和过程设计工程师、管理者和研究者们用来验证和证实他们的新概念和新发现的不可或缺的工具。

机器人研究的新趋势如下：在当今和未来机器人技术的发展和应用中，在机械方面可能会发展得更快、更有柔性、更灵巧，在智能方面会发展得更强大。由于机器人在工业和专门领域的应用，以及社会和个人服务方面潜在的巨大市场和社会需求，机器人系统的设计、性能以及工艺已经跨越到一个全新转型时期。面临着转型时期激烈的竞争和挑战，机器人研究绝不会落后。相反，机器人研究具有强劲的发展势头，它将快速地向发展并且创造出更好的解决方案，在未来几年创造出更多创新成果，获得新的发现来加快机器人技术的发展^[9-12]。

图 1-3 描述了机器人研究和机器人系统进化树。早期时代，树的主干是创新和不断发展的工业机器人。机器人的研究源于工业机器人的开发，工业机器人的开发激发了机器人研究的积极性，机器人的研究也受到工业机器人开发的挑战，树干分支前机器人的研究发

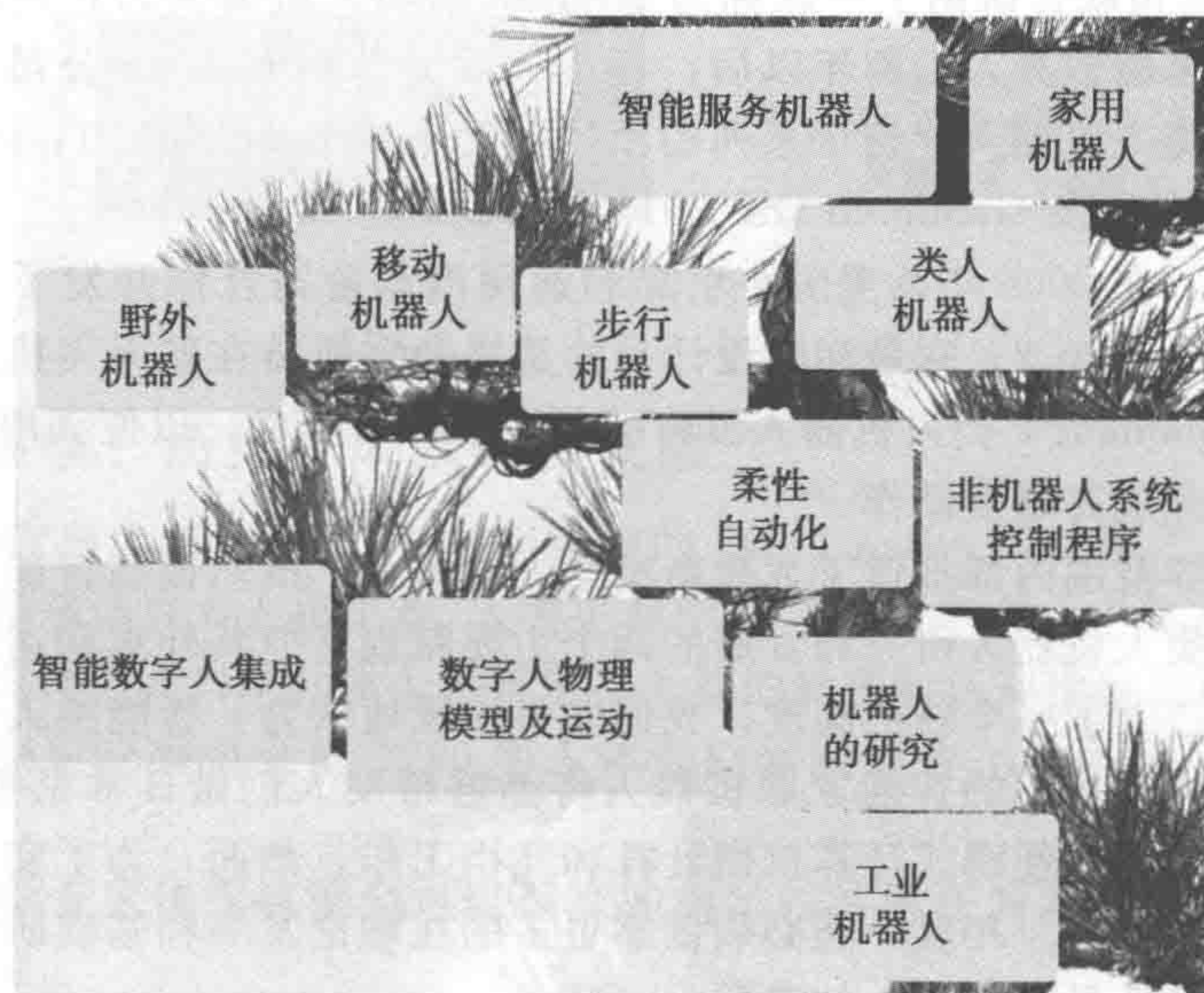


图 1-3 机器人的研究和进化

展到树干的顶端。随着机器人研究的迅速增长和逐渐成熟,它变得更有能力创造新型的机器人系统,并且推动新的研究分支萌芽和成长。除了生产和开发各种各样的服务机器人,随着机器人系统建模方法和控制理论的发展,孕育了一些新的研究和应用分支。数字化人体建模及应用就是其中的典型。其他的还包括非机器人系统动力学建模和控制策略设计,如军用车辆的炮塔控制系统、直升机和直升机甲板以及球-木板控制系统,这些将在第 8 章中讨论。

大量新型服务机器人和类人机器人正在占据如今的机器人舞台,而工业机器人技术的发展速度也从未放缓。相反,它们获得更多动力来不断创新新型机器人模型和系统,以此提高其柔性和自动化,更好地服务于制造和生产线。过去是由单机器人手臂操作作业,如今是双机器人或者机器人群组协调自动化操作作业。最近应用的典型案例是自动化汽车“白车身”装配站,通过基于 PLC 的以太网/无线通信全局控制 20 多台工业机器人组焊接和制造汽车车身。

其中最引人注目的,也是最值得庆祝的成就是类机器人的发展,它构成了各种服务机器人和家用机器人的基础。类机器人的发展历史甚至早于工业机器人^[15]。1495 年,意大利数学家、工程师列奥纳多·达·芬奇设计了神似装甲骑士的机器人,它被称为达·芬奇机器人。1973 年,日本东京早稻田大学设计了更具有时代感的类人机器人 Wabot-1。Wabot-1 机器人能够行走,能用人造嘴巴和人进行日语对话,也能用外部接收器(如人造耳朵和眼睛)来测定目标的距离和方向。十年之后,他们又推出了一款新型音乐类人机器人 Wabot-2,它能够与人对话,用眼睛看懂乐谱并在电子琴上演奏一般难度的曲子。1986 年以来,本田研发了从 E0(实验机型 0)到 E6 的七款双足机器人。1986 年研发了 E0,1987~1991 年研发了 E1~E3,1987~1993 年研发了 E4~E6。之后,本田在双足机器人基础上加入了上肢,推出 P1(原型机 1)~P3 机型作为 E 系列的升级机型。2000 年,本田完成了第 11 款双足类机器人的研发,被称为阿西莫机器人,它不仅可以行走,而且还能跑步。

从那以后,许多公司和研究机构连续推出了多款类机器人模型。2003 年,日本大阪大学和 Kokoro 公司联合研制了一款称为 Actroid 的类机器人,它用硅胶“皮肤”覆盖整个机器人,看起来酷似真人。两年以后,日本大阪大学和 Kokoro 公司在东京研制了一款新系列的超现实类机器人。这个系列的原始机型是 Geminoid HI-1,随后研制了 Geminoid-F(2010 年研制)以及 Geminoid-DK(2011 年研制)。

值得一提的是,在 2006 年,美国宇航局和通用汽车公司合作开发了一款非常先进的类机器人——Robonaut 2。它最初的设计目的是协助宇航员在航天飞机或太空站进行科学实验。因此,Robonaut 2 类机器人没有腿部,仅有上半身,以便利用它灵巧的手部和手臂在失重环境下完成高难度动作^[16,17]。

几乎每年在世界范围内都报道了大量新型类机器人。虽然提高智能程度和实现逼真的动态运动仍然是类机器人研究和发展的两个主要瓶颈,但其外观和运动速度已经取得了革命性的突破,迈上了一个新的高度。我们非常乐观地认为,智能类机器人可能会比预期更早地变成现实。真正的智能家居机器人将能够帮助人们做日常家务事、招待客人,甚至能够取代台式机或者便携式计算机做计算和文档工作。然而,为了实现这个目标,仅做技术开发工作是不够的。相反,还必须依靠更多的在理论发展和基础研究方面的新发现和新方案来克服每一个具有挑战性的障碍。

作为机器人基础研究近况的总结,有许多课题仍在开展:

1. 欠驱动机器人或非完整约束机器人系统的自适应控制；
2. 柔性关节或柔性连杆机器人的动力学控制；
3. 开链串联机器人和闭链并联机器人两者之间的对偶关系；
4. 实时影像处理和智能模式识别；
5. 机器人学习和智能控制的稳定性；
6. 机器人对复杂环境的交互和适应性；
7. 机器人和环境之间闭环反馈的感知性能；
8. 机器人物理运动的认知互动；
9. 机器人动力学控制和人机交互的更多开放性课题。

总之，本书的机器人分析部分是为了激励和鼓励读者接受所有新的挑战，并对当前和未来的机器人研究以及系统设计和应用尽最大的努力。本书机器人学部分将涵盖并主要集中于三大基本问题：运动学、动力学、控制以及相关的 MATLAB 编程问题。具体地，图 1-4 给出了上述内容在机器人学中的定义。本书不讨论机器人的力控制、机器人学习和智能控制、机器人视觉和识别、传感反馈控制，以及基于可编程控制器和人机交互(HMI)的机器人集群的网络化控制。读者可以参考相关文献或技术文件来了解这些面向应用的主题。

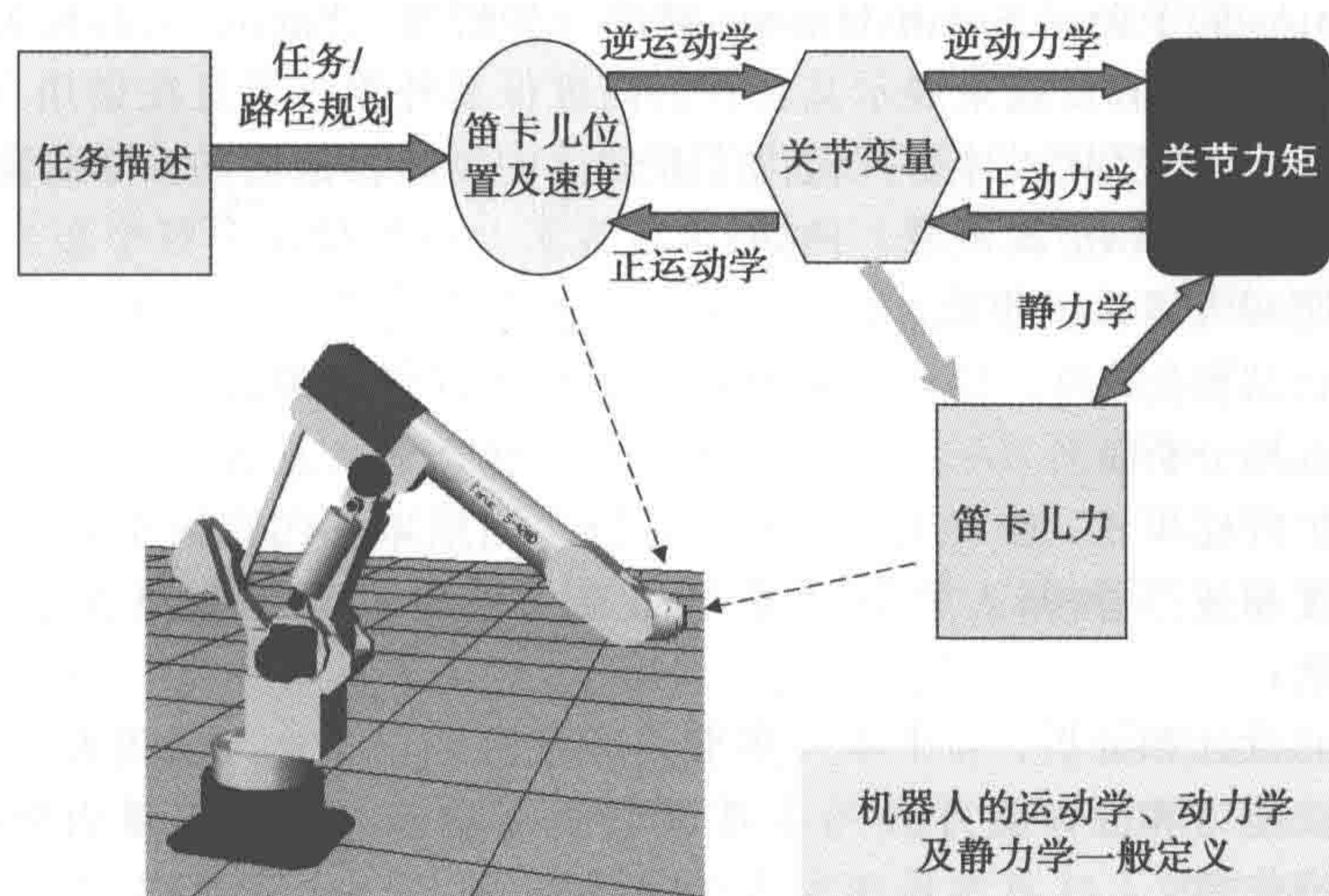


图 1-4 机器人学中的重要定义

1.2 数字人建模：历史、成就和新挑战

2008 年，密歇根大学 HUMOSIM 研究室的 Don Chaffin 博士做了一个综述评论^[19]。在评论的开头，他强调许多人机工程/人类工程学专家都渴望有一个具有鲁棒性的分析模型，这个模型具有模拟人口统计学上特定定义人群的物理和认知性能的能力。他还提到了一份来自美国国家研究委员会的 1990 年人体性能建模报告，并强调这种模型具有如下优点：

1. 人类工程学专家使用该模型可以模拟和测试各种潜在的人类行为理论，从而明确新研究的优先领域。
2. 专家们可以使用该模型实现人们在各种环境下的行为的认知和表达。

3. 这种模型能够提供一种更好的表达人体性能属性的手段, 也为其他想要在设计中考虑人类工程学的人提供了一种参考。

由于计算能力的限制, 直到 20 世纪 70 年代末, 数字人物理建模才开始进行初期尝试, 而且也仅仅是概念上的。随着计算机计算速度、内存和图像性能的指数级提高, 人体模型及其运动可以在数字化环境中实现逼真的可视化, 这将帮助人类工程学专家、工程师、设计师和经理更有效地评估、验证他们的理论方案、产品设计、工作分析以及复杂人体控制操作。

根据 Chaffin 的综述, 计算机化人体性能模型最早是由 K. Kilpatrick 在 1970 年完成的。他制作了一个 3D 人体图解模型来演示这个模型如何运动并达到坐姿状态。20 世纪 70 年代后期, 一些复杂的数字化人体模型诞生。当时, 英国研制了协助人机交互评估系统 (SAMMIE), 目前它成为世界上占据主流地位的数字人模拟软件包之一。在 20 世纪 80 年代后期, Safework 和 Jack 展示了他们的新型实时运动人体模型及其独特的功能特性。在 20 世纪 90 年代早期, 丹麦的 AnyBody Technology 公司研制了一个数字环境的人工肌肉骨骼模型, 主要在汽车工业应用中模拟各种工作状态^[18]。

其中, 在最近的数字人建模历史上最引人关注的成就是, 爱荷华大学计算机辅助设计中心 Santos 的 Karim Abdel-Malek 博士在 21 世纪初研究和开发的虚拟士兵模型^[22,23,24]。目前它正在 Santos 的子公司 SantosHuman 被进一步研发。Santos 人体模型不仅在数字环境中使用可变形的肌肉和皮肤来展示其独特的高度保真外貌, 而且在借用和采用机器人建模理论和方法方面对数字化人体研究做出了开创性的贡献。他们的多学科研究已经整合了许多主要的数字人建模和仿真领域, 例如:

- 人体性能和人体系统集成;
- 姿态和运动预测;
- 任务仿真和分析;
- 肌肉和生理建模;
- 动态强度和疲劳分析;
- 全身振动;
- 防弹衣的设计和分析;
- 军人作战能力和生存能力;
- 服饰鞋帽建模;
- 手部建模;
- 直观界面。

MADYMO(数学动态模型)是最有代表性的建模和动态仿真软件工具之一^[20]。在 20 世纪 90 年代初期, 荷兰应用科学研究(TNO)组织汽车安全解决方案部门(TASS)研制了 MADYMO 用于研究汽车碰撞虚拟仿真。它提供了几种数学仿真模型, 可以在碰撞中进行可视化的实时响应。基于安全标准和法律要求, 它还拥有一个强大的后台处理功能来给出详细的分析和检查结果。此外, MADYMO 提供了一个实用的安全气囊和安全带设计的仿真工具, 以及真实事故的重建和分析功能。

虽然经过了 30 年的深入研究和发 展, 数字人模型的设计和工程应用方面已经取得了非常令人鼓舞的成就^[20,21], 但是仍然有许多重大问题有待于进一步研究。具体可以概括如下:

1. 虽然在数字人的外观真实感方面已经取得了突破, 但是在数字人运动的高保真性

方面却存在许多欠缺有待改进,尤其是在连续运动、高速运动以及复杂约束环境下的运动;

2. 需要进一步建立更有效和更具有适应性的人-环境相互作用模型;
3. 需要进一步提高数字人物理模型在复杂人体测量学、生理学和生物力学方面的适应性,以及数字人的视觉和听觉反应的模型化表达;
4. 实现数字人的物理模型和非物理模型,包括心理、感觉、认知和情感之间的真正的集成。

1.3 借助机器人分析方法进行数字人建模

回顾机器人和数字人建模的研究和技术开发的历史,可以发现,每一次技术进步和前沿创新总是反映在主要商业仿真软件产品中。虽然大多数图形模拟软件会显示一个小的“窗口”表明自己的开放式体系结构特征,并号称允许用户编写自己的应用程序进行研究、测试或者验证,而实际上,当用户自己编写的程序准备好与这些软件产品通信时,往往需要特殊的应用程序编程接口(API)以便识别和运行用户自己的应用程序。因此这些软件的应用就受到了限制,不适合用于科研和教学。最理想的是有一种集建模、编程、修改、细化以及动画图像于一身的应用软件,如 MATLAB 软件,它可以创建一个灵活的、人性化的以及真正开放式的数字环境体系结构用于未来机器人和数字人的图形仿真研究。

通过为读者提供初步的理论基础,本书的目的是研究借助机器人的分析实现数字人建模的过程。在建立这个数字人模型后,读者就可以在 MATLAB 中模拟一个 3D 实体模型或者人体模型,并且驱动这个模型使其运动。读者可能很快就会发现编写 MATLAB 代码并不困难,因为它是最高级的计算机语言。最麻烦的问题是机器人或人体模型图背后必要的数学变换知识。这就是为什么要在通过编写 MATLAB 代码创建期望的数字动画模型之前必须建立理论模型的根本原因。最近 MATLAB 新增了机器人工具箱,这肯定有助于人们对机器人理论的概念理解,有助于学习机器人建模过程的数值解法和运动算法。

10

为了成功地将机器人方法应用到数字人建模,本书除了机器人运动学、静力学、动力学和控制的理论基础之外,还将重点介绍基本的数字建模过程、运动算法和优化方法。制作真实的人体模型的外观以适应不同的人体测量数据和人体认知模型不是本书的重点。实际上,如果创建足够多的曲面并且进一步把它们组合在一起,只要花足够的时间,总是可以雕塑出细致入微、表面清晰的曲面,看起来像真正的肌肉/皮肤一样。此外,读者也可以连接相邻表面的数据产生一定的变形效果。因此,本书将介绍一些典型数学造型和变形算法实例,在此基础上,读者可以将其扩展到更高级和更复杂的程序编写过程中。

另外,在本书的数字人建模部分,数字人模型的关节偏置和连杆长度等运动学参数的设置,都是依据人体测量数据给出的。在建模程序中,参数的设置和重置都很方便,并且这些参数的改变不会改变运动学的结构。例如,采用静力学来分析搬运物料时数字人模型的关节力矩分布时,显然,不同的运动学参数设置将产生不同的结果。但是,如果输入一组恰当的参数,根据人体测量数据给出的关节力矩分布的结果,这将会准确反映人体的负重性能。目前已经建立了多个可用的人体测量数据库^[20],如 CAESAR、DINED、A-CADRE、美军的 Natick、美国 NASA 的 STD3000 以及 MIL-STD-1472D

等。读者可以参考有关文件和文献找到合适的数据库来进行高可靠性的数字评估与评价。

从真正的人体肌肉骨骼结构的角度来看,完美的模型要考虑人体的每一块肌肉和关节结构,目前基于刚体的数字人物理模型很难被认为是精确的和满意的模型。尽管如此,目前的数字人建模毕竟为未来目标模型的架构奠定了基础。随着研发的不断深入,具有真实运动并能够实现与复杂环境真正智能交互的理想数字人模型终将在不远的未来变成现实。

另一方面,由于机器人研究的不断成熟,通过借用机器人建模理论和运动算法来发展数字人模型和运动成为可能。因此,本书的组织结构是沿着从机器人分析到数字人建模的过程展开的。第 2 章和第 3 章介绍相关的数学基础知识。第 4 章介绍机器人建模过程和运动学方程。第 5 章将学习冗余机器人以及串联/并联机器人系统的运动学正、反解。第 6 章介绍并说明创建零件并组装的主要步骤,以便在 MATLAB 中使用 3D 实体绘制完整的机器人系统实体模型。第 7 章介绍机器人动力学,如建模、分析和算法等。第 8 章介绍机器人控制的高级课程:从独立关节伺服控制到全局动态控制。一些有价值的机器人系统和数字人的控制方案,如自适应控制和反推控制器的设计过程也将在第 8 章中详细讨论。

从第 9 章开始,主题将转到数字人建模。第 9 章描述了数字人的局部、全局运动学和静力学。第 10 章使用 MATLAB 创建零件后装配生成 3D 实体模型,并驱动实体模型实现基本的和高级的运动。手臂和数字传感的建模也包含在第 10 章。第 11 章介绍全局观念下的数字人动力学模型,探索如何使用全局动态算法生成真实运动。在第 11 章的最后,将对两个典型数字人动态运动案例进行建模、研究和仿真。最后,介绍了可以用于模拟具有反推控制器设计能力的 k 级联大规模系统的人机动态交互系统的交互控制总体策略。

参考文献

1. Asada, H., Slotine, J.: Robot Analysis and Control. John Wiley and Sons, New York (1986)
2. Fu, K., Gonzalez, R., Lee, C.: Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. McGraw-Hill, New York (1987)
3. Spong, M., Vidyasagar, M.: Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons, New York (1989)
4. Murray, R., Li, Z., Sastry, S.: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, Boca Raton (1994)
5. Craig, J.: Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 3rd edn. Pearson Prentice Hall, New Jersey (2005)
6. Bekey, G.: Autonomous Robots, From Biological Inspiration to Implementation and Control. The MIT Press, Cambridge (2005)
7. Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L., Thrun, S.: Principles of Robot Motion, Theory, Algorithms, and Implementation. The MIT Press, Cambridge (2005)
8. Siciliano, B., Khatib, O. (eds.): Springer Handbook of Robotics. Springer (2008)
9. Sciavicco, L., Siciliano, B.: Modeling and Control of Robot Manipulators. McGraw-Hill (1996)
10. Lenari, J., Husty, M. (eds.): Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands (1998)
11. Cubero, S. (ed.): Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. Pro Literatur Verlag, Germany/ARS, Austria (2006)

12. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G.: *Robotics, Modeling, Planning and Control*. Springer (2009)
13. Bangsow, S.: *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk Usage and Programming with Examples and Solutions*. Springer, Heidelberg (2009)
14. Wikipedia, Plant Simulation (2012),
http://en.wikipedia.org/wiki/Plant_Simulation
15. Wikipedia, Humanoid Robot (2011),
http://en.wikipedia.org/wiki/Humanoid_robot
16. Ambrose, R., et al.: ROBONAUT: NASAs Space Humanoid. *IEEE Intelligent Systems Journal* 15(4), 5763 (2000)
17. Wikipedia, Robonaut (2012),
<http://en.wikipedia.org/wiki/Robonaut>
18. Chaffin, D.: On Simulating Human Reach Motions for Ergonomics Analysis. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 12(3), 235–247 (2002)
19. Chaffin, D.: Digital Human Modeling for Workspace Design. In: *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, vol. 4, p. 41. Sage (2008), doi:10.1518/155723408X342844
20. Moes, N.: Digital Human Models: An Overview of Development and Applications in Product and Workplace Design. In: *Proceedings of Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE) 2010 Symposium*, Ancona, Italy, April 12–16, pp. 73–84 (2010)
21. Duffy, V. (ed.): *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human factors Engineering*. CRC Press (2008)
22. Abdel-Malek, K., Yang, J., et al.: Towards a New Generation of Virtual Humans. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 1(1), 2–39 (2006)
23. Abdel-Malek, K., et al.: Santos: a Physics-Based Digital Human Simulation Environment. In: *The 50th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, San Francisco, CA (October 2006)
24. Abdel-Malek, K., et al.: Santos: A Digital Human In the Making. In: *IATED International Conference on Applied Simulation and Modeling*, Corfu, Greece, ADA542025 (June 2008)