

智能机器人先进技术丛书

 World Scientific

机器人学和 计算机视觉的集群计算

Cluster Computing for Robotics and
Computer Vision

[美]达米安·莱昂斯 (Damian M Lyons) 著
宋 宇 李庆玲 译

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能机器人先进技术丛书



机器人学和 计算机视觉的集群计算

Cluster Computing for Robotics and
Computer Vision



[美]达米安·莱昂斯 (Damian M Lyons) 著

宋宇 李庆玲 译

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人学和计算机视觉的集群计算 / (美) 莱昂斯 (Lyons, D.) 著; 宋宇, 李庆玲译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 1

书名原文: Cluster computing for robotics and computer vision

ISBN 978-7-5640-9959-6

I. ①机… II. ①莱… ②宋… ③李… III. ①机器人学②计算机视觉
IV. ①TP24②TP302. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 028530 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-5835

Copyright © 2011 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 203 千字

版 次 / 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元

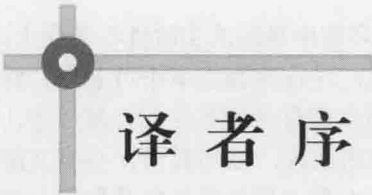
责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



译者序

受北京理工大学出版社委托，有幸翻译本书。这是译者学术生涯的第一本译著，其翻译过程历时一年，完成之际，深感翻译外文著作过程的艰辛。但同时，译者也收获颇多。科研中，译者主要从事基于视觉的自主机器人环境建模、定位、导航领域的研究工作。一直以来，对于大数据量的视觉处理任务、机器人定位与地图构建相关处理算法的高计算代价与自主机器人导航实时性之间的矛盾比较茫然，无法找到有效的解决方案。因而，具体实施时往往需要在算法的计算复杂度和性能这两个关键指标上折中考虑。但通过对本书的学习和翻译，译者对如何采用集群计算技术来处理这一棘手问题有了新的认知，这对译者的学术、科研工作提供了非常有益的启发和帮助。

机器人学和计算机视觉是人工智能领域的两个重要研究分支，二者相互渗透，密不可分。计算机视觉在机器人学中又称为机器人视觉，相关技术也广泛地应用于工业生产、军事、服务、医疗、家居以及教育等领域。就新理论、新技术而言，机器人学和计算机视觉发展日新月异，各种算法层出不穷，每年的权威国际会议（如 CVPR、ICCV、ICRA、IROS）以及权威期刊（如 TPAMI、IJCV、IJRR、TRO 等）都会报道大量的新算法、新技术、新应用。然而，机器人学和计算机视觉中的很多新方法的关注点都落在诸如精度、稳定性、鲁棒性、识别率等指标上，对于如何提高计算效率或实时性则少有报道。例如，对于视觉目标跟踪问题，需要综合处理目标尺度、外观、照明条件的改变以及遮挡等多种实际因素，为综合处理这些因素，跟踪算法的实施过程也逐渐变得更为复杂，典型的如在线机器学习方法。然而，视觉跟踪的实时性也是非常关键的问题，方法的性能即使再优秀、精度再高，如不能保证实时性，就失去了实际意义。因而，自然而然的问题是：在保证跟踪算法性能且不对其本身作简化的条件下，如何实现实时处理？再如，机器人学中的在未知环境下同时定位与地图构建（SLAM），其过程涉及底层传感器信息处理、信息融合、不确定性分析与处理、机器人定位、环境地图创建与维护等多方面，因而具有很高的计算复

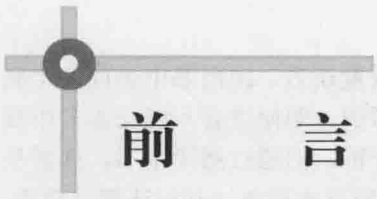
杂度,在这种情况下如何保证机器人在未知环境中导航的实时性?实际上,算法或任务的复杂度与实时性是相互矛盾的,往往鱼和熊掌不可兼得。针对这一实际问题,本书为提高复杂、大数据量处理任务或算法的计算效率,给出了一条有效途径,即利用集群计算技术来实现。然而目前,少有文献介绍机器人学或计算机视觉中的复杂算法、大数据量处理任务是如何与集群计算相关联,进而结合集群计算提高计算效率、改善实时性能的。从理论贡献角度来讲,这本书中没有给出机器人学和计算机视觉中的新理论、新方法。但译者认为,将集群计算及其相关工具引入机器人学和计算机视觉领域,进而通过代表性常用算法的集群实施来提高其计算效率并给予相应的加速性能分析,是本书的主要特点及贡献。

本书在介绍集群计算的相关概念、术语、操作及工具(MPI)的基础上,探讨了诸如机器人学中航迹推算、蒙特卡罗定位、传感器信息处理、地图学习、行为架构等问题的集群计算,并给予相应的加速性能分析;对于计算机视觉,是以底层图像处理(二值化、平滑、锐化等)、多尺度图像处理、Condensation 视觉目标跟踪、视觉路标选择与无监督学习为例,进行了详细的分析与讲解。正如原著作者美国福德汉姆大学达米安·莱昂斯博士所述:机器人学和计算机视觉中涉及的方法为数众多,难以在书中实现完全列举并给出相应集群计算实施过程。但通过本书,希望读者可以找到使用集群计算技术来解决复杂算法集群实施的切入点。除本书给出的例子外,受本书启发,译者这里还可以举几个可以通过集群计算提高计算效率的例子,如机器学习中的各类 Boosting 算法(可用于 Condensation 视觉目标跟踪的目标模板在线学习)、鲁棒模型拟合中的各类 RANSAC 算法(常用于立体匹配、视觉里程计)、基于粒子滤波的未知环境下机器人定位与地图构建的 FastSLAM 算法等,这些算法都可通过集群计算技术来提高计算效率、改善方法的实时性能。

本书翻译过程得到了译者所在课题组的康轶非、闫德立、姜雪菲、李智、褚明帅、查允平等研究生的无私帮助,在此一并表示感谢,同时感谢北京理工大学出版社张海丽编辑的引荐。因本书涉及的知识领域非常广泛,学科跨度较大,且本人水平及精力有限,现有译文中肯定还存在许多不足。如有不确切之处,望读者能够和我联系,以便改进,来信请联系 songyuhit@163.com。

宋 宇

2014 年 8 月



前言

目前, 机器人技术正逐步向许多新的应用领域扩展, 例如, 军事、服务、家居以及教育等领域。为了满足这些新的应用领域中所需的高计算能力, 需要利用最新的计算技术。集群计算就是利用一组商业化的普通计算机系统获得超级计算能力的新技术。近年来, 随着多核处理技术的涌现、成熟, 甚至是单台计算机已经可以为集群提供多个处理器, 使得在机器人学和计算机视觉相关算法中应用集群计算成为可能。

本书的第一个目的在于为从事集群计算领域, 或是机器人学及计算机视觉领域的研究、应用工作的专业技术人员 (或学生) 提供这两个领域技术交叉、融合的具体实例, 探讨如何利用集群计算技术解决机器人学及计算机视觉领域中常见的一些具体问题。第二个目的是期望推动机器人学及计算机视觉这两个研究领域进一步卓有成效地探索、融合。

本书是以适合于高年级本科生 (或机器人爱好者) 或研究生的实际水平而撰写的。为使本书适合于更广泛的读者, 在具体应用集群计算解决机器人学或计算机视觉的实际问题之前, 书中均介绍了一些相关的关键概念与算法。

本书中算法与应用实例的选择均是以便于读者理解为基础的: 对于熟悉机器人学与计算机视觉的读者, 书中的算法及应用范例将使这类读者容易理解集群计算的相关概念与操作; 同样, 对于熟悉集群计算的读者, 选择的算法及应用范例将使这类读者容易理解机器人学或计算机视觉的相关方法。本书的前三章对机器人学和集群计算中的一些基本概念、方法、分类作简要介绍。在其后的章节中, 将更深入地讨论较为复杂的机器人学、计算机视觉算法及其集群计算问题。

读者会发现, 书中从第 2 章起每章后均有参考文献, 每章的参考文献仅包含该章中引用的文献。尽管每章的参考文献可能会有重复的部分, 但作者希望采用这种每章单独列举参考文献的模式为读者查询、定位文献提供便利。当然, 为了本书的完整性, 各章的参考文献在本书的最后进行了汇总。本书的附录包含了书中涉及的相关 MPI 的详细资料, 这些资料来源



于 MPI V2.2 的说明文档。

机器人学和计算机视觉中涉及的算法数量众多，因而书中难以完全列举这些算法及其集群计算实施。本书作者希望，即便读者不能在本书中找到他们需要的某种算法的集群实施及性能分析，但通过阅读本书，读者至少可以找到解决该问题的切入点，找到使用集群实现算法并行计算的途径。

本书在编写过程中得到很多人的鼓励和帮助，作者在此对他们表示感谢。首先，感谢 Michael Arbib 和 Ken Overton，是他们将一个只具有分布式计算知识的工程学生带入到麻省理工学院·艾默斯特校区（Umass）的感知机器人实验室，从而激发了作者对并发性和机器人学的兴趣。作者非常幸运，能够与许多杰出且有见地的专业人员相识并一起工作，他们是 Ron Arkin、Paul Benjamin、Tomas Brodsky、Eric Cohen-Solal、Teun Hendricks、MiSuen Lee、Yunting Lin、Tom Murphy，以及许多其他人员。特别感谢福德汉姆大学（Fordham University）我的导师和朋友 Frank Hsu。感谢 Stephen Fox、Gary Weiss 和 Arthur G. Werschulz 对本书早期草案版本的评论和帮助。同时，感谢参加作者在福德汉姆大学讲授的并行计算和机器人学课程学习的学生，他们是 Sirhan Chaudhry、Sothearith Chanty、Jeremy Drysdale、Jose Deleon、Giselle Isner、Andy Palumbo、Kiran Pamnany 等。本书中的许多内容均在课堂上经过了前期讲解。

最后，作者对自己的家人表示感谢。为撰写本书，作者在过去的几年中大多数时间是在办公室或实验室中度过的，感谢家人的包容、理解和支持。

达米安·莱昂斯

2010 年 12 月

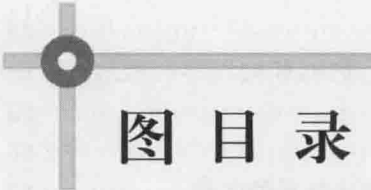


图 目 录

图 1-1 类人机器人	1
图 1-2 Unimation Puma 560 工业机器人	2
图 1-3 iRobot 510 PackBot 机器人 (经 iRobot 公司许可转载)	3
图 2-1 DARPA 城市挑战赛: 斯坦福大学的 Junior 无人驾驶汽车	7
图 2-2 通用对称多处理器架构	9
图 2-3 七层 OSI 通信模型	11
图 2-4 外置集群配置	16
图 2-5 实现自载集群与机器人硬件的连接	17
图 3-1 两种机器人灵巧手	20
图 3-2 手完成接近和抓取过程的时间重叠照片	21
图 3-3 机器人目标抓取过程的同步信息发送与接收	24
图 3-4 具有对数时间复杂度的集合通信方法	26
图 3-5 采用 1~16 处理器执行并行计算时, 分散时间理论值与实际值的对比 ($n=1\ 200 \times 4 \times 8$, $\lambda=3\ \mu\text{s}$, $\beta=1\ \text{Gb/s}$)	31
图 3-6 采用 1~16 处理器执行并行计算时, 归约或广播时间理论值与实际值的对比 ($n=1\ 200 \times 4 \times 8$, $\lambda=3\ \mu\text{s}$, $\beta=1\ \text{Gb/s}$)	32
图 4-1 典型移动机器人系统	36
图 4-2 机器人在全局坐标系中位置与航向	37
图 4-3 Quinn 的数据块分配宏定义	39
图 4-4 航迹推算 MPI 代码	40
图 4-5 单个数组的分散操作	40
图 4-6 机器人分 36 步做一个圆周运动: 分成 4 组, 连续的 9 步为一组, 且起点为原点 (0, 0) 的逆时针运动 (左); 将前面的 9 步运动加到下一组 9 步运动中形成原来的圆周运动 (右)	42
图 4-7 在集群上并行计算机器人最终位置的 MPI 程序	43
图 4-8 各处理器中间结果数组示意图 (图中 $n/p=3$ 并且只给出前三个处理器和归约数组)	46



图 4-9 串行与并行执行的时间性能	48
图 4-10 按行和按列数据分区模式下, 执行时间和处理器的数量关系图 ($m=100, n=400, a=b=7\text{ ns}, \lambda=3\text{ }\mu\text{s}, b=1\text{ Gb/s}$)	52
图 5-1 移动机器人外部传感器	56
图 5-2 传感器测量信息从局部坐标系到全局坐标系的转换	57
图 5-3 单个机器人固定位置时并行和串行传感器坐标转换算法的性能。显示了在不同的 n 情况下, 串行和按列划分数据的并行时间 ($\lambda=3\text{ }\mu\text{s}, \beta=100\text{ Mb/s}, a=b=7.3\text{ ns}$)	60
图 5-4 多机器人、多位置的并行和串行性能, 加速比曲线及 karp-Flatt 度量	62
图 5-5 一个机器人($r=1$)在有 12 个位置点的路径中的声呐数据($n=16$)	63
图 5-6 Hough 直线检测程序代码	65
图 5-7 图 5-5 中数据集生成前的 30 条 Hough 直线	66
图 5-8 5 个处理器时 Hough 空间数据分块	68
图 5-9 串行算法、非均衡负荷并行算法和均衡负荷并行算法时间性能曲线 ($n=1\text{ }000, \chi=350\text{ ns}, n_p=n_a=100, \lambda=3\text{ }\mu\text{s}, \beta=1\text{ Gb/s}, a=b=7.3\text{ ns}$)	69
图 5-10 先锋 3-AT 移动机器人和激光测距仪数据	69
图 5-11 局部特写和极坐标扫描匹配	70
图 6-1 二维空间的占据栅格图描述	79
图 6-2 声呐概率模型	81
图 6-3 带状地图和棋盘格地图切分	83
图 6-4 占据栅格地图的更新	87
图 6-5 根处理器中的占据栅格地图集成	89
图 6-6 蒙特卡罗定位算法中粒子分布	93
图 6-7 并行蒙特卡罗定位($\lambda=3\text{ }\mu\text{s}, \beta=100\text{ Mb/s}, n_x=180, \chi=7.3\text{ }\mu\text{s}$)	96
图 6-8 改进串行部分后的并行蒙特卡罗定位($\lambda=3\text{ }\mu\text{s}, \beta=100\text{ Mb/s}, n_x=180, \chi=7.3\text{ }\mu\text{s}$)	98
图 6-9 串行部分改进前后, 并行蒙特卡罗定位的加速性能对比	98
图 7-1 针孔相机及成像模型	101
图 7-2 某一场景的数字图像	102
图 7-3 道路跟踪	103
图 7-4 对大小为 640×480 的彩色图像执行色彩转换、二值化的串行、并行执行性能对比($\lambda=3\text{ }\mu\text{s}, \beta=1\text{ Gb/s}, \chi=730\text{ ns}$)	106
图 7-5 原始图像、平滑图像及锐化图像	107

图 7-6	一种 3×3 图像卷积核实例	108
图 7-7	原始二值化图像及平滑后的二值图像	108
图 7-8	对图 7-3 (a) 的场景执行多尺度边缘检测的结果 (3 个尺度)	110
图 7-9	图像直方图和原始灰度图像	115
图 7-10	并行 Condensation 图像跟踪算法中不同数据分区方法的性能对比	117
图 8-1	场景环境及其路标和与该场景等价的拓扑地图	124
图 8-2	路标图像、空间直方图及空间均值	125
图 8-3	路标图像、直方图及空间均值	126
图 9-1	“垂直”分层和“水平”分层	137
图 9-2	到达和抓取方案集合	138
图 9-3	静态觅食行为架构	139
图 9-4	动态觅食行为架构	147

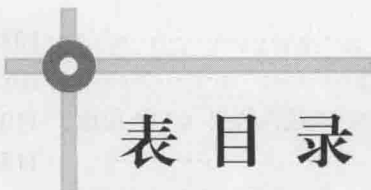
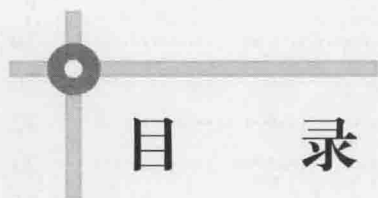


表 目 录

表 2-1	Hewlett-Packard ProCurve 2848 交换机性能·····	11
表 2-2	HP ProCurve 2924 交换机性能·····	11
表 7-1	多尺度通信时间对比·····	113
附表 II-1	MPI 数据类型与等价的 C 数据类型 (摘自 2009 年的 MPI 接口标准版本 2.2)·····	157
附表 III-1	MPI 归约操作 (摘自 2009 年的 MPI 接口标准版本 2.2)·····	159



目 录

第 1 章 引言	1
1.1 机器人	2
1.2 集群计算	3
1.3 本书概述	5
第 2 章 集群与机器人	7
2.1 并行计算	8
2.1.1 并行架构	8
2.1.2 多处理器	9
2.1.3 多计算机	10
2.2 集群技术	12
2.2.1 术语	12
2.2.2 集群配置	13
2.2.3 集群编程	14
2.2.4 集群配置	14
2.2.5 基于 OpenMPI 的简单集群配置	14
2.2.6 连接集群与机器人	15
2.3 总结	17
参考文献	18
第 3 章 集群编程	20
3.1 并行编程方法	20
3.2 MPI 编程	23
3.2.1 信息传递	23
3.2.2 单程序多数据模型	24
3.2.3 集合通信	25
3.3 MPI 程序的编译和运行	27
3.4 并行计算时间复杂度分析	28
3.4.1 加速比和阿姆达尔 (Amdahl) 定律	29

3.4.2 通信和计算	29
3.4.3 通信模型	30
3.5 总结	32
参考文献	33
第4章 机器人运动	35
4.1 二维移动式机器人运动学	36
4.2 航迹推算	37
4.2.1 分区: 数据块分解	38
4.2.2 程序设计	39
4.2.3 分析	44
4.3 带中间结果的航迹推测	44
4.3.1 分区	45
4.3.2 程序设计	46
4.3.3 分析	47
4.4 多机器人的航迹推算	48
4.4.1 分区	49
4.4.2 程序设计	50
4.4.3 分析	51
4.4.4 局部和全局缓存	52
4.5 总结	53
参考文献	54
第5章 传感器	55
5.1 传感器采集信息的转换	56
5.1.1 分区: 单机器人位置	58
5.1.2 分析	59
5.1.3 分区: 多机器人位置	60
5.1.4 分析	61
5.2 由声呐数据绘制地图	62
5.2.1 利用 Hough 变换检测直线	63
5.2.2 分区	64
5.2.3 程序设计	65
5.2.4 分析	66
5.2.5 并行 Hough 的负荷均衡	67
5.2.6 分析	68
5.3 激光扫描测量的配准	69

5.3.1 极坐标匹配	70
5.3.2 分区及分析	72
5.3.3 程序设计	73
5.4 总结	76
参考文献	77
第 6 章 地图构建与定位	78
6.1 构建空间占用地图	80
6.1.1 声呐概率模型	80
6.1.2 贝叶斯滤波	81
6.1.3 地图数据分区	82
6.1.4 程序设计	83
6.1.5 分析	89
6.1.6 基于传感器读数的数据划分	90
6.1.7 程序设计	90
6.1.8 分析	91
6.2 蒙特卡罗定位	92
6.2.1 分区	93
6.2.2 程序设计	94
6.2.3 分析	95
6.2.4 改进串行部分	96
6.3 总结	98
参考文献	99
第 7 章 视觉与跟踪	101
7.1 道路跟踪	103
7.2 图像处理	103
7.2.1 数据分区	104
7.2.2 程序设计	105
7.2.3 分析	106
7.2.4 空间像素运算	107
7.2.5 数据分区	108
7.2.6 程序设计	109
7.3 多尺度图像处理	110
7.4 图像跟踪	113
7.4.1 空间直方图	114
7.4.2 条件信度传播 (Condensation) 图像跟踪算法	116

7.4.3 数据分区	117
7.4.4 程序设计	118
7.5 总结	119
参考文献	121
第8章 路标学习	123
8.1 路标空间直方图	124
8.2 K 均值聚类算法	126
8.2.1 分区	127
8.2.2 程序设计	128
8.2.3 分析	129
8.3 EM 算法	130
8.3.1 分区	131
8.3.2 程序设计	132
8.3.3 分析	133
8.4 总结	133
参考文献	134
第9章 机器人架构	136
9.1 基于行为的机器人技术	136
9.2 静态的基于行为的结构	138
9.2.1 分区	140
9.2.2 程序设计	140
9.2.3 分析	144
9.3 动态的基于结构的行为	146
9.3.1 程序设计	147
9.3.2 分析	150
9.4 总结	150
参考文献	151
附录 I 关于 mpirun 命令的 OpenMPI 帮助文档概要	153
附录 II MPI 数据类型	157
附录 III MPI 归约操作	159
附录 IV MPI 应用编程接口 (API)	160
参考文献	166
索引	173

第1章 引言

过去一段时间里，任何一本关于机器人技术的书籍都会以机器人具体的定义来开篇。在一定程度上，这是因为人们对科幻小说中的机器人认识已远远超过了对真实机器人的认识。由于人们很少看到真实的机器人，因此本书作者需要注意这种错误认识给读者带来的负面影响，也许是失望。如果说我们已经完全摆脱了这种对机器人的错误认识，目前或许还有点早，因为现在媒体中较为常见的机器人，其外观和行为有时似乎与科幻小说中描述的更为相近。

例如，图 1-1 (a) 所示的是 Robonaut2 机器人，该机器人为典型的类人机器人，用于辅助宇航员工作和探索太空。图 1-1 (b) 所示为日本 AIST 研制的类人机器人 HRP-4C。一定程度上，这两种类人机器人的外观和动作更像科幻小说中虚构的机器人而不像已经在工业生产中广泛应用的工业机器人。20 世纪 50 年代末，George Devol 和 Engelberger 建立了第一家机器人公司 Unimation，自那时起，工业机器人实际上就一直伴随在我们身边。图 1-2 所示为 Unimation Puma 560 工业机器人，它由 Unimation 公司研制，目前已经广泛地应用于工业生产的大多领域，如焊接、装配、包装等。

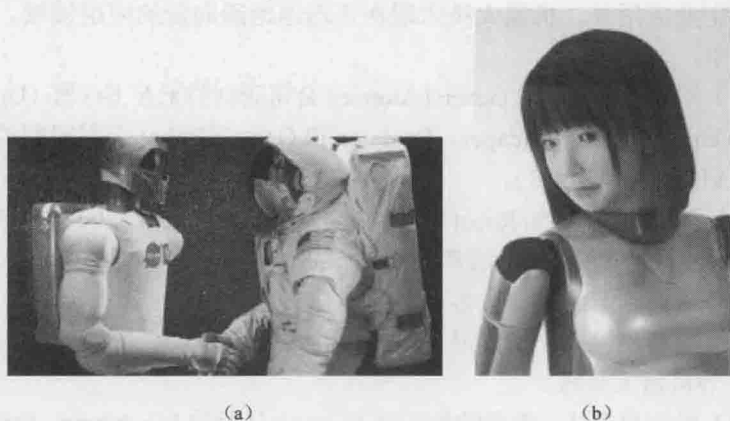


图 1-1 类人机器人

(a) Robonaut2 (R2) 机器人 (经 NASA 许可转载);

(b) 类人机器人 HRP-4C (经日本 Unimation 公司许可转载)



图 1-2 Unimation Puma 560 工业机器人

1.1 机器人

机器人自诞生以来, 机器人技术一直主要用于工业制造领域。对于工业机器人, 其运行时周围的环境, 或者说机器人的世界, 能够严格地控制(环境为结构化环境)。机器人需要操作或者作用的操作对象能够准确地定义, 并且这些操作对象的时序和位置能够精确地预先设定。这样一来, 工业环境被限制在机器人的传感器、执行器和控制器能够快速准确运行的前提下。

除工业应用外, 机器人技术现在正迅速地涌向新的应用领域, 典型的应用如下:

(1) 军用机器人。如 General Atomics 公司研制的无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) Reaper、Predator 和 Gnat, iRobot 公司研制的无人车 510 PackBot 等(图 1-3)。

(2) 服务机器人。如 Robot Watch 公司研制的安保机器人 OFRO, RedZone Robotic 公司的管道和隧道清理机器人产品, da Vinci 外科手术机器人系统, 以及医院和博物馆的向导机器人系统等。

(3) 家用机器人。如索尼公司的 AIBO 和 QRIO, iRobot Roomba 和 Scooba 等机器人系统。

(4) 教育机器人。典型的如乐高(Lego)公司的 Mindstorm、Stiqetto、HandyBoard 等。