

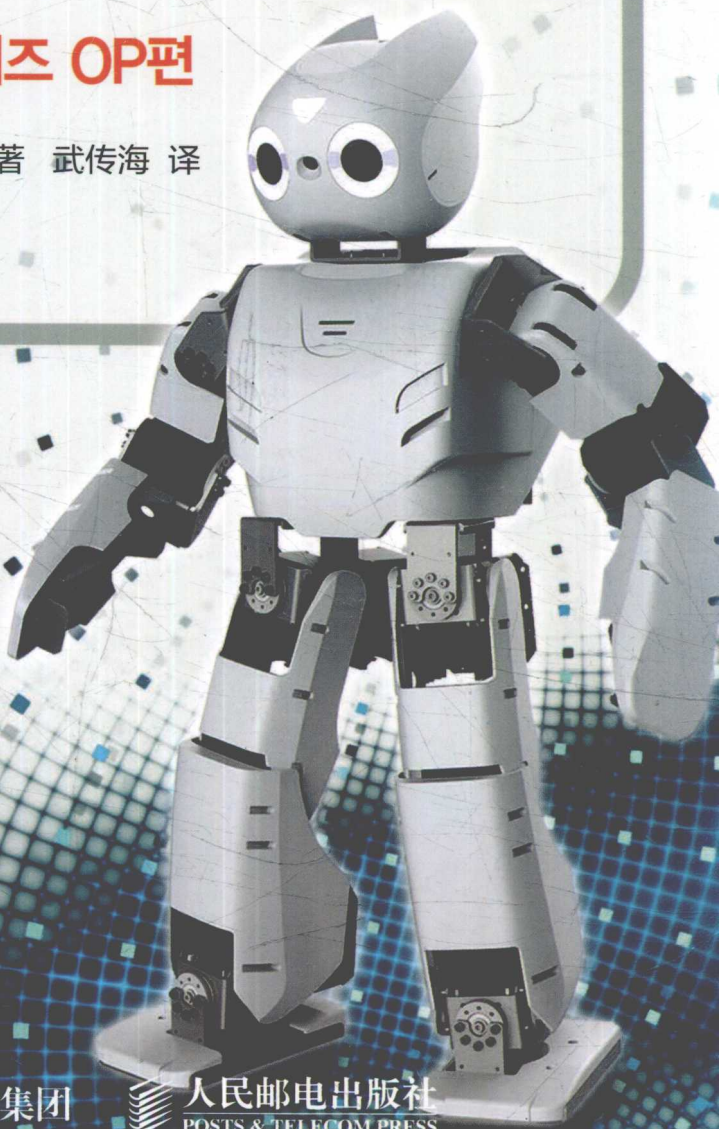


ROBOTIS OP

仿人机器人权威指南

함께 즐기는 휴머노이드 로봇 **로보티즈 OP편**

[韩] 金钟熠 (Jong-Wook Kim) 著 武传海 译



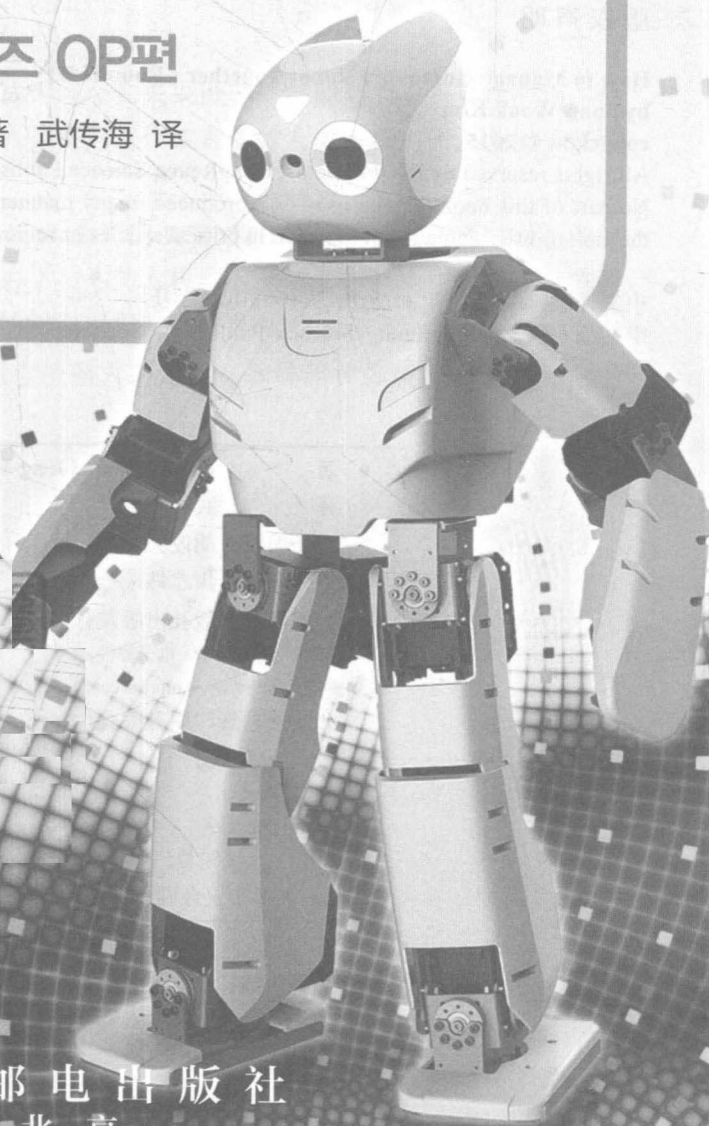


ROBOTIS OP

仿人机器人权威指南

함께 즐기는 휴머노이드 로봇 **로보티즈 OP편**

[韩] 金钟熠 (Jong-Wook Kim) 著 武传海 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

Robotis OP仿人机器人权威指南 / (韩) 金钟熠
(Jong-Wook Kim) 著 ; 武传海译. — 北京 : 人民邮电
出版社, 2018.2

ISBN 978-7-115-47302-8

I. ①R… II. ①金… ②武… III. ①仿人智能控制—
智能机器人—教材 IV. ①TP242.6

中国版本图书馆CIP数据核字 (2017) 第284370号

版 权 声 明

How to Manage Humanoid Robot Together : Robotis OP

by Jong-Wook Kim

copyright © 2015

All rights reserved by the proprietor, HongReung Science Publishing Company

No part of this book may be used or reproduced in any manner whatever without written permission except in the case of brief quotations embodied in critical articles or reviews.

中文译本: 版权所有 © 2018 人民邮电出版社

中文版本依据 HongReung Science Publishing Company 的安排通过 Media Solutions (东京) 和 Agency One (首尔) 出版。

-
- ◆ 著 [韩] 金钟熠 (Jong-Wook Kim)
 - 译 武传海
 - 责任编辑 胡俊英
 - 责任印制 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京市艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
 - 印张: 28
 - 字数: 566 千字 2018 年 2 月第 1 版
 - 印数: 1—1 500 册 2018 年 2 月北京第 1 次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2016-2066 号
-

定价: 119.00 元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

内容提要

随着科技的不断发展，机器人逐渐成为现今和未来世界值得期待的又一科技产物。仿人机器人模拟人类的主体结构，可以与人类协同工作或者代替人类进行工作，全世界范围内都在积极地研究并开发它。

本书通过 6 章内容，全面介绍了 Robotis 公司的 ROBOTIS OP 机器人。通过对基础理论、仿人机器人运动学、仿人机器人动力学、为仿人机器人创建动作及动作生成等章节的学习，读者将深度了解仿人机器人的各种知识点和关键技术点。

本书适合机器人爱好者阅读，也适合机器人研发和竞赛等相关领域的专业人士参考学习。

序言

仿人机器人模拟人类的主体结构，是一种由上体与下体组成的机器人平台。它可以与人类协同工作或者代替人类进行工作，全世界范围内都在积极地研究并开发它。在 2011 年 3 月福岛核电站核泄漏事故发生之前，仿人机器人的应用重点放在智能生活的服务上，比如在家庭或公司中充当向导，代人提物，或者按时给老人拿药等；事故之后，人们进一步改进了仿人机器人，使其可以提供某种特殊的服务，如代替人类进行危险作业，或者在灾难现场保护人类等。

2000 年，日本开发了 ASIMO 机器人。2004 年，韩国向大众公开了 HUBO 机器人。2015 年 6 月，在美国举行的 DRC 决赛中出现的仿人机器人可以两腿直立行走，可以开门，用手工作，上下楼梯，与人类对话。像这样，仿人机器人不只存在于科幻电影中，现在它们正在一点点地步入我们的现实生活中。

仿人机器人的目标是实现人类可以做的所有行为，并进一步具有人类的智能与感性，与人类真正进行沟通。其应用领域是无穷无尽的。但是相比于其他领域而言，仿人机器人相关技术发展相对缓慢，原因很多，如机器人零件（各种传感器、执行机构、嵌入式系统）昂贵、多种复杂信号处理及动作生成技术的困难、与人类相比对情势的判断能力明显低下，智能水平低等。为了解决这些问题，除了不断进行研究开发之外，笔者认为目前最迫切的是培养专业人才，让他们掌握仿人机器人的相关理论，同时要培养他们的实际动手能力。

令人遗憾的是，目前讲解仿人机器人的专业书籍在全世界范围内都很难找到。这里说的专业书籍系统讲解有关仿人机器人的机械原理与动力学理论，并收录有机器人实用技术的示例代码。有感于此，我在 2012 年 8 月出版了《仿人机器人》一书。它以 Robotis 公司的 BIOLOID 为对象，介绍机器人有关理论与实用技术，以及动作创建等示例。转眼之间，

3年多过去了，Robotis 公司推出了 ROBITIS OP（原名叫 DARwIn OP）机器人，它比之前的 BIOLOID 在硬件与软件方面有很大的升级。于是，我以 ROBITIS OP 为对象，对之前出版的图书在理论与示例方面做了大量修改补充，并将其作为专业教材重新出版。

MATLAB 是全世界范围内广泛使用的仿真软件，一般理工科学生、研究生、工程技术人员都会使用它。掌握有关仿人机器人的基础理论后，使用 MATLAB 对各种运动与直立行走等进行模拟，再编写为 C++ 代码，然后在基于 Windows 或 Linux OS 的 ROBITIS OP 上进行测试、应用。本书会对这一过程进行详细讲解，并提供相关源代码供各位使用。换言之，本书系统讲解了仿人机器人相关理论以及基本的实用技术。通过阅读本书，各位将会对仿人机器人产生兴趣，有助于提升在这方面的能力与自信。

由于本人水平有限，以及受到篇幅的限制，本书并不涵盖各种技术的方方面面，相关内容将在后续版本中不断添加。如同制造一个像人类感知、思考与行动的仿人机器人一样，希望各位读者朋友给予关心、支持与帮助，相信将来会越来越好。

在本书写作与出版过程中，我得到了许多人的帮助与支持，借此机会向他们表达深深的谢意。他们分别是洪陵科学出版社社长及员工，感谢他们的辛勤付出，还有给予大力支持 Robotis 公司的金炳洙代表、为我提供技术支持的金熙日，以及开发 ROBITIS OP 的许多国内外研究人员。

最后，特别感谢我的爱人与两个女儿（珪丽与智芸），谢谢她们在本书写作期间对我的忍耐与鼓励。在此把本书献给家人，一起分享喜悦。

Jong-Wook Kim

2015 年 8 月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人历史	1
1.2 仿人机器人的历史	4
1.3 韩国及国外机器人产业动向	15
第 2 章 仿人机器人运动学	17
2.1 齐次坐标变换	18
2.2 利用 DH 方法为仿人机器人建模	28
2.2.1 DH (Denavit-Hartenberg) 方法	28
2.2.2 在仿人机器人中应用 DH 参数法	39
2.2.3 利用优化算法做 DH 法的逆向运动学计算	63
2.3 利用投影法对仿人机器人建模	87
2.3.1 投影法	87
2.3.2 向仿人机器人应用投影法	88
2.3.3 利用投影法的仿人机器人逆向运动学	100
2.3.4 投影法中的重心计算	110
第 3 章 仿人机器人动力学	113
3.1 动力学基础	114
3.1.1 角速度 (angular velocity) 与线速度 (linear velocity)	114
3.1.2 齐次变换时的线速度计算	120

3.1.3 利用 DH 方法计算仿人机器人连杆的线速度与加速度	124
3.1.4 利用投影法计算仿人机器人关节坐标的二次微分式	133
3.2 仿人机器人的关节扭矩	137
3.2.1 扭矩	138
3.2.2 关节扭矩计算方法	140
3.3 零力矩点 (ZMP)	153
3.3.1 利用 DH 方法计算 ZMP	155
3.3.2 利用投影法计算 ZMP	157
3.4 倒立摆的控制	162
第 4 章 ROBOTIS OP	170
4.1 OP 硬件	173
4.1.1 控制器	174
4.1.2 执行机构	177
4.1.3 传感器	184
4.2 软件开发	190
4.2.1 搭建开发环境	190
4.2.2 P 框架	195
4.3 启动 OP	213
4.4 运行现有功能	221
4.4.1 运行示例教程	221
4.4.2 运行 Action Editor	223
第 5 章 为仿人机器人创建动作	229
5.1 仿人机器人的关节角关系式	229
5.2 为机器人动作生成电动机轨迹	242
5.2.1 为关节电动机生成旋转角度轨迹	242
5.2.2 关节轨迹的优化变量	248
5.3 原地转向	254
5.4 双足行走	269
5.4.1 步行准备姿势优化	272
5.4.2 步行准备姿势调整	280

5.4.3 为双足行走优化关节角度轨迹	296
5.4.4 模拟具有多种特征的双足行走	325
第 6 章 ROBOTIS OP 的动作生成	347
6.1 关于 optWalk	347
6.2 传感器校准	351
6.2.1 利用陀螺仪传感器做角度推测	353
6.2.2 利用加速度传感器做角度推测	363
6.2.3 利用互补滤波器 (complementary filter) 做姿势推断	367
6.2.4 FSR 传感器	374
6.3 平衡控制	378
6.3.1 矢状面下体关节角的 ZMP 反射神经控制	379
6.3.2 上体角反射神经控制	392
6.4 为 OP 生成动作	397
6.4.1 OP 动作代码	397
6.4.2 OP 的动作生成函数	402
6.4.3 调整 OP 面部 LED 的颜色	421
6.5 OP 双足行走	423
6.5.1 OP 步行驱动	423
6.5.2 OP 步行生成函数	428
6.5.3 让 OP 稳定行走	434
参考文献	436

第 1 章

绪论

1.1 机器人历史

仿人机器人拥有人类外形，经常出现在《铁臂阿童木》《魔神 Z》《跆拳道 V》等动画中，以及《机械战警》《终结者》《机械公敌》《变形金刚》等科幻电影中，一直存在于人们的想象之中（见图 1.1）。机器人的始祖是工业机器人，从 20 世纪中期开始商业化，大量投入到工业生产线。iRobot 公司的扫地机器人 Roomba 从 2003 年开始在全世界范围内进行销售，一跃成为服务型机器人的著名品牌。随着技术进步与融合时代的到来，预计到 21 世纪 20 年代中期就会进入一人一机器人的时代。许多机器人专家达成共识，一致认为每人拥有一台以上伴侣机器人（companion robot）的时代很快就会到来。



图 1.1 以机器人为主角或配角的电影

现代人对“robot”（机器人）一词已经非常熟悉，它初次出现在捷克剧作家卡雷尔·恰

佩克在 1920 年所写的戏剧《罗素姆万能机器人》(Rossum's Universal Robot) 中。剧中, 罗素姆父子建造了某种人造人 “Robota”, 它们只是努力工作, 最后它们有了自主意识, 意识到自身一直被利用, 决定铲除人类。顺便说一下, robota 一词在捷克斯洛伐克语中带有 “工作” 与 “强制劳动” 的含义。

机器人用来代替人类从事简单重复作业, 从事要求高精度的作业, 或者具有危险性的作业。全世界有很多大学与研究所在进行相关研究。在工业领域中, 工业机器人最先开发成功并应用到工业现场中。1954 年, 美国人 George Devol 申请了工业机器人专利, 当时名称为 “可编程装置”。1961 年, Joseph Engelberger 开发出了工业制造机器人 Unimate (见图 1.2), 并将其投入到 General Motors 公司的组装生产线上, 这在世界上还是首次。此后, 从 1961 年福特汽车首先把模具铸造机械的脱吸机器人投入到工作现场后, 多种工业机器人被开发并制造出来。

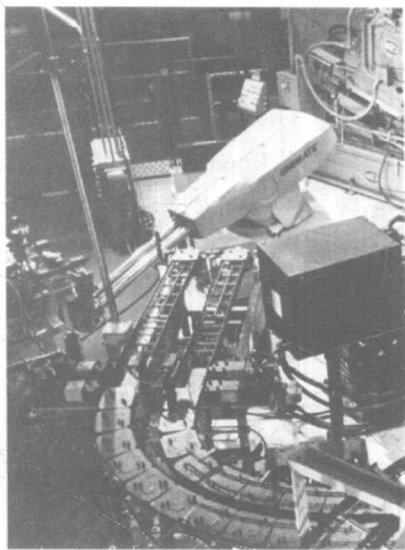


图 1.2 最早的工业机器人 Unimate

工业机器人是第一代机器人, 被定义为 “可重复编程的通用操作机械”。它们被设计与制造出来, 主要用来从事一些重复性的工作, 有些工作需要保持高精密度与高可靠性, 如焊接、组装、涂装 (painting)、转送等。工业机器人由电力驱动, 只要不发生电气与机械故障, 它们就可以 24 小时不间断地工作, 逐渐取代从事简单工作的人力。中国台湾富士康 (Foxconn) 是世界上最大的电子产品生产企业, 为了降低人力成本, 计划用 3 年时间把 100 万台机器人投入到生产线中 (2011 年 7 月 30 日, 新华通讯社)。

2012 年全世界机器人市场规模达到 133.2 亿美元，其中工业（用于制造）机器人约为 86.8 亿美元（占 65.2%），专业服务型机器人约为 34.2 亿美元（占 25.7%），个人服务型机器人约为 12.2 亿美元（占 9.2%）。工业机器人所占份额超过半数以上。然而，从年平均成长率来看，个人服务型机器人占 17.7%，专业服务型机器人占 15.1%，制造型机器人占 8.2%，从中可以看出工业机器人成长速度逐渐放缓。最近，工业机器人融入了更多先进技术，如尖端信息通信技术、用户友好型软件、嵌入式系统、人工智能、物联网（Internet of Things）技术等。全世界研究人员都在积极研究探索在 Smart Factory 中机器人如何实现与人类有效地进行合作。

工业机器人在固定场合根据程序预先编写好的指令反复执行指定的任务。美国 NASA 制造的探测机器人（rover）与此不同，它被开发用来执行高难度工作。Sojourner 在 1997 年被发射到火星，拥有 6 个特殊驱动轮、太阳能电池板、摄像机、数据传送天线，并且带有嗅觉设备，可以感知气味、分析土壤或岩石成分，利用这些设备，对火星表面岩石组成元素进行检测，并把数百张照片发送回地球。当时，Sojourner 成功地完成了指定的任务。接着，为了调查火星表面岩石与土壤的样本，NASA 在 2004 年又向火星发射了 Spirit Rover 与 Opportunity Rover。它们应用了智能技术，不仅可以实时感知周围环境，还可以根据周围环境自主运行。在 2012 年着陆火星的 Curiosity Rover（见图 1.3）也属于这种探索型机器人。它一直活跃在火星上，不断向 NASA 发送探测信息，从这些信息可以推断火星地表下很有可能存在液态水。

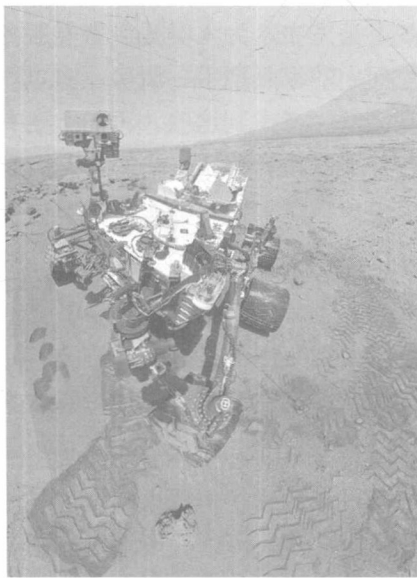


图 1.3 火星探测机器人 Curiosity Rover

像这样，科学技术越发达，就越需要机器人拥有智能（intelligence），要求机器人具备自主判断、运行，以及从事复杂作业的能力。我们把拥有这种智能的机器人称为智能机器人。

一般地，智能机器人被定义为可以自动感知（perception）外部环境，对周围情况做出判断（cognition），并自主做出相应动作（mobility）的机械装置（韩国在2008年2月出台了智能机器人开发与普及促进法案）。更具体地说，智能机器人是机械、电子、信息、生物工程技术的融合产物，综合运用了环境识别、信息获取、智能判断、自主行为等人工智能技术。它可以向人类提供帮助，并代替人类在恶劣环境中工作，或者从事特殊作业。当今世界趋势表现为快速老龄化、低出产率、个体化、社交网络、技术融合、追求健康生活等，这些趋势进一步增强了对智能机器人的需求。

智能机器人大致可分为个人服务型机器人、专业服务型机器人、工业机器人。

- 个人服务型机器人：以普通人为服务对象，向他们提供服务的机器人，如家用机器人（扫地机器人等）、教育机器人、娱乐机器人、个人秘书机器人、看护机器人、伴侣机器人等。
- 专业服务型机器人：协助专家，向社会提供所需服务的机器人，如医疗机器人、国防机器人、建设机器人、社会安全机器人等。
- 工业机器人：应用于各种工业生产活动的机器人，如生产制造机器人、农业机器人、渔业机器人等。

智能机器人常驻于家庭或办公室中，为人类提供智能服务，必须能够与人类相互进行智力、情绪交流。人类居住空间中的家具把手、厨房、家电产品全部依据人类自身的身体条件制造，并且门槛与楼梯有高低。考虑到这些，再加上要有亲切感的外形，最合适的机器人不是轮式机器人，而是拥有类似人类身体结构的仿人机器人（人形机器人）。

1.2 仿人机器人的历史

仿人机器人在设计时模仿了人类身体骨骼与肌肉结构，拥有20~40个自由度的复杂结构，并且两足行走技术难度较大，所以经过很长时间的才出现在大众面前。

对于机器人人类外形的研究最早可以追溯到绘画天才莱昂纳多·达芬奇（Leonardo da Vinci）。莱昂纳多·达芬奇在1495年制作了机器人骑士（见图1.4），并在宫廷宴席中进行展示。据说通过操纵滑轮与绞绳，机器人可以做出坐下与站起的动作，也可以移动胳膊，以及把盔甲的面罩（visor）向上抬起。

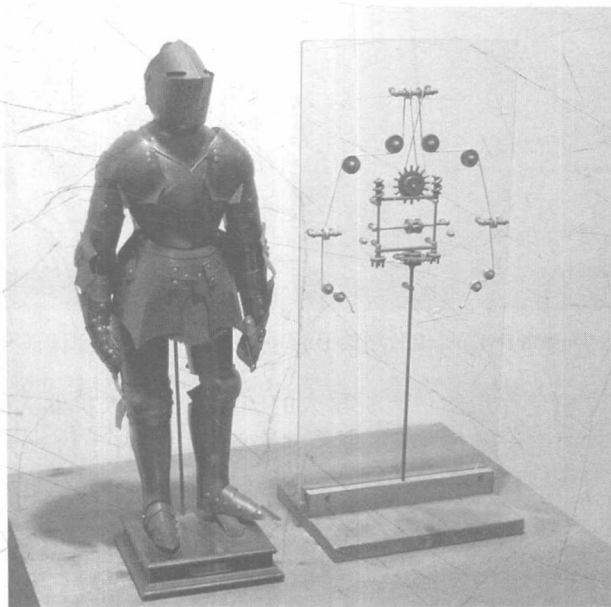


图 1.4 莱昂纳多·达芬奇的机器人骑士 (robot knight)

19 世纪, John Brainerd 开发出了依靠蒸汽机驱动运行的 Stream Man, Frank Reade Junior 开发出了 Electric Man, 引起了人们对仿人机器人的关注。

20 世纪初, 美国 Westinghouse 公司研发出了名叫 Elektro 的仿人机器人。到 1970 年左右, 日本正式开始发表关于有足机器人的研究。同时, 俄罗斯与美国也在积极研究多足机器人 (四足或六足机器人)。美国在 1980—1983 年间成功开发了名叫 cmU 的六足机器人 (hexapod), 最高行走速度为 0.11 m/s, 相比以前, 相关技术得到了很大的提高。此外, MIT 从 20 世纪 80 年开始积极研究跳跃机器人, 并推出了名叫 Spring、Flamingo、Uniroo 的三维两足行走机器人。通过静态步行与动态步行, 它们可以做出行走与跑跳动作。

在四足机器人中, 在姿态稳定性与性能方面表现最优秀的机器人当数美国 Boston Dynamics 公司在 2005 年推出的 BigDog。它在美国 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, 国防部高级研究计划署) 资助下被开发出来, 主要任务是帮助军人运载装备, 整机重量达 110 kg, 时速为 6.4 km, 可以运送 150 kg 的物资, 攀越 35° 斜坡。BigDog 的执行机构不是电动机, 而是液压缸执行机构, 可以提供更大承载力, 内置大约 50 个传感器, 借助机载计算机对姿态与运动进行准确控制。Boston Dynamics 在 2008 年进一步改进了 BigDog, 推出了 AlphaDog。它可以自由地在光滑冰面上行走。即使从一旁猛踹, 它也能轻松地保持平衡。到 2013 年 10 月, 该公司又推出了 WildCat, 奔跑时速达到 26 km, 集中体现了四足步行机器人的尖端技术 (见图 1.5)。

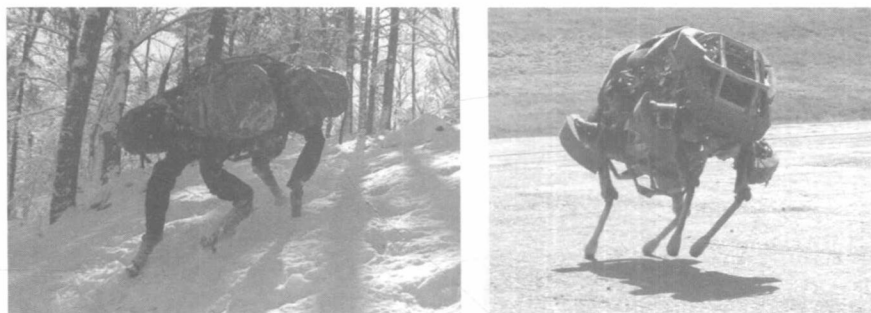


图 1.5 Boston Dynamics 公司的 BigDog (左侧) 与 WildCat (右侧)

日本是最早开发可稳定行走的仿人机器人的国家。在仿人机器人的研究领域，他们一直保持着领先。日本早稻田大学从 1966 年就开始研究两足行走机器人 (WL 系列)，并在 1968 年开发出了世界上第一个步行机器人 WL-3。此外，在 1983 年推出的 WL-10R 使用 10 个伺服电机驱动关节，实现前进、后退以及改变方向等操作。早稻田大学最新的仿人机器人是在 2009 年推出的 WABIAN (WAseda Bipedal humANoid) -2R (见图 1.6)，共有 41 个关节，身高为 1.53 m，体重为 64.5 kg。该机器人的平均步行速度为 0.36m/s，每一步的周期是 0.96 s。

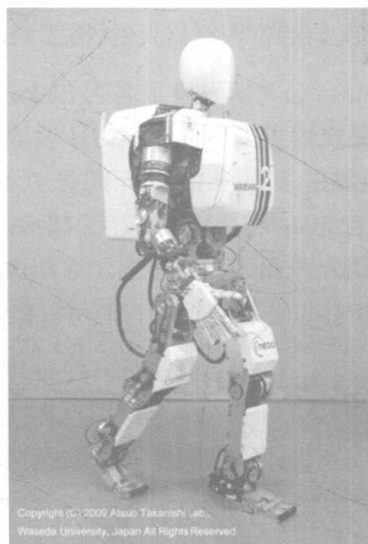


图 1.6 早稻田大学的 WABIAN-2R

日本汽车制造公司 Honda 借鉴了 WL 系列机器人的优秀技术，在 1986 年到 1993 年间开发出了 E0~E6，在 1993 年到 2000 年间开发出了 P1~P3 系列仿人机器人。最终，Honda

公司在 2000 年 11 月第一次面向普通人推出了仿人机器人 ASIMO (Advanced Step in Innovative MObility)。这让全世界的机器人研究人员大为吃惊, 之前他们一直认为仿人机器人是不可能实现的。

此后, Honda 公司不断对 ASIMO 进行升级, 在 2002 年推出一代 ASIMO, 它具备与人沟通的能力, 可以理解人类的姿势与身体动作; 接着在 2004 年推出二代 ASIMO, 其动作性能得到极大改善, 移动速度达到 3 km/h; 在 2005 年推出三代 ASIMO, 它可以完成“8”字形行走与人牵手行走、推着手推车走, 或者递盘子等动作; 2007 年推出的新一代机器人可以与多台 ASIMO 一起协同工作, 或者在同一个空间中进行单独作业; 2011 年推出的新一代机器人可以与周围环境或周围的人进行互动, 通过物体的位置信息, 可以自主决定下一个行动, 其运动能力也得到大幅增强, 最大时速达 9 km; 在 2014 年推出新一代 ASIMO, 其手指得到大大改进, 拥有 13 个自由度, 可以精巧、温柔地抓握物体, 甚至可以做手语动作。Honda 公司不断改进 ASIMO, 不断书写着仿人机器人的新历史。目前, ASIMO 研究人员把主要精力放在增强机器人的人工智能上, 让它能够在无人工操控的情形下可以自主行走, 对人类的特定行为进行观察, 并对可能出现的结果进行预测。此外, ASIMO 可以通过影像从人群中识别出某些人。当多个人同时说话时, 它也可以识别出多个语音。图 1.7 中显示的 ASIMO 高度为 130 cm, 质量为 48 kg, 拥有 57 个自由度 (头部 3、胳膊 7×2 、手部 13×2 、上身 2、腿部 6×2)。

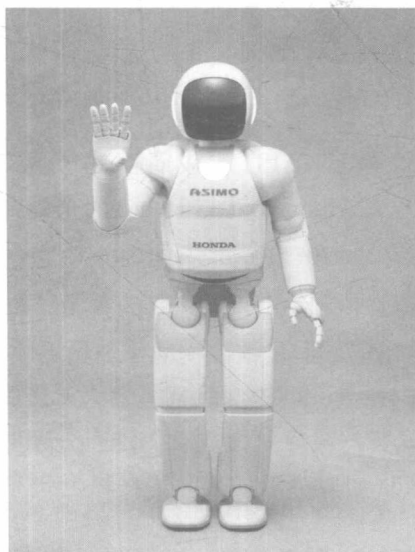


图 1.7 Honda 公司的 ASIMO

与 ASIMO 相比,普通人对 HRP (Humanoid Robotics Project) 系列机器人知道的并不多,但是它在仿人机器人研究人员之间更为出名。日本的 AIST (国立产业技术研究所) 在 P3 (ASIMO 之前的原型) 基础上经过不断改进研发,开发出了 HRP 系列机器人。HRP 项目的目标是研究协助人类和与人类互助的机器人系统。他们从 1998 年开始不断进行研究,在 2002 年开发出了 HRP2 仿人机器人 (见图 1.8)。HRP2 的高度为 154 cm,质量为 58 kg,拥有 30 个自由度的人造关节,其后续机型 HRP3 可以使用 4 根手指抓握小的物体。在 2010 年推出的 HRP4C (见图 1.8),拥有少女的脸庞与形体,行走起来就像人类一样自然。它是一款更接近人类的仿人机器人。



图 1.8 HRP2 (左侧,能够跟着人抬着木板行走)与 HRP4C (右侧,拥有少女形体)

在 ASIMO 成功的刺激下,韩国 KAIST 吴俊镐教授 (机械工程专业) 的研究小组在 2004 年 12 月成功开发出了 HUBO (由 Humanoid 与 Robot 两个词合成) 仿人机器人 (见图 1.9)。HUBO 身高为 120 cm,体重为 55 kg,步幅长为 35 cm,行走时速为 1.25 km。

HUBO 仿人机器人拥有声音识别与合成功能,两只眼睛可以分别移动,具备完美视野,5 根手指可以分别动作,能做出剪子、包袱、锤动作。吴俊镐教授研究小组从 2002 年 1 月开始开发人形机器人,经过 KHR-1、KHR-2 几代机器人,最终开发出 HUBO,历经 3 年时间,投入数百亿 (韩元) 研究费,最后获得成功。这充分证明了韩国的机器人技术达到世界一流水平。与此相比, Honda 研发 ASIMO 耗费了 15 年时间,据估算投入的研发资金高达数千亿 (韩元)。

KAIST 在 2008 年到 2009 年之间开发出了 HUBO2 (见图 1.9),其设计更加精简,采用铝合金材料,整身重量轻了 20% (45 kg),行走时可以像人类一样舒展开腿部,只需很