

Humanoid Robots 仿人机器人

(日) 梶田秀司 编著
管贻生 译



清华大学出版社



Original Japanese Edition

Humanoid Robots

By Shuuji Kajita, Hirohisa Hirukawa, Kazuhito Yokoi and Kensuke Harada

Copyright © 2005 by Shuuji Kajita

Published by Ohm-sha, Ltd.

EISBN: 4-274-20058-2

This Chinese Language edition is published by Tsinghua University Press

Copyright © 2007

All rights reserved.

本书中文简体字版由日本株式会社 Ohm-sha 授权清华大学出版社独家出版发行。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2006-3569 号

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

仿人机器人/[日]梶田秀司编著;管贻生译. —北京:清华大学出版社,2007.3

书名原文: Humanoid Robots

ISBN 978-7-302-14453-3

I. 仿… II. ①梶… ②管… III. 智能机器人 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 164584 号

责任编辑: 薛 慧

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机: 010-62770175

邮购热线: 010-62786544

投稿咨询: 010-62772015

客户服务: 010-62776969

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 143×210 印 张: 7.5 字 数: 193 千字

版 次: 2007 年 3 月第 1 版 印 次: 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 26.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 020986-01

内 容 简 介

本书是国际上第一部系统介绍仿人机器人的专著。内容包括仿人机器人学的运动学、ZMP 和动力学、双足步态规划、全身运动模式的生成和动力学仿真等,是对 10 多年来仿人机器人的研究成果的总结。本书图文并茂,深入浅出,内容丰富,对广大读者了解和掌握当今世界在仿人机器人上的最新发展和水平具有重要参考价值。

Original Japanese Edition

Humanoid Robots

By Shuuji Kajita, Hirohisa Hirukawa, Kazuhito Yokoi and Kensuke Harada

Copyright © 2005 by Shuuji Kajita

Published by Ohm-sha, Ltd.

EISBN: 4-274-20058-2

This Chinese Language edition is published by Tsinghua University Press

Copyright © 2007

All rights reserved.

本书中文简体字版由日本株式会社 Ohm-sha 授权清华大学出版社独家出版发行。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2006-3569 号

译者序

仿人机器人是真正字面意义上或狭义的“机器人”，其研究和发展代表了机器人学的尖端水平。有关仿人机器人的工作早在 20 多年前就开始了，当时着重于双足步行机的研究和开发。只是自从 10 年前本田推出仿人机器人 P2 后，仿人机器人的研发才形成了一个热潮，至今方兴未艾。除了日本推出了 QRIO、ASIMO 和 HRP-2 等著名的仿人机器人以外，中国、韩国、美国和欧洲等国家和地区也成功地研制了各自的仿人机器人。虽然仿人机器人的研究已成为机器人学中的一个重要分支，有很多研究人员和工程技术人员在这方面进行了大量的学术研究和技术开发，并取得了丰硕的成果，但却未见到系统地介绍和阐述仿人机器人的专著。

在这种背景下，由日本产业技术综合研究所梶田秀司等人著的《仿人机器人》夺得了先声，填补了这方面的一个空白。据译者所知，该书是第一部系统介绍仿人机器人的专著。* 书中既有对仿人机器人历史发展的简明扼要的介绍，又有基本理论和分析，还有对实际机器人系统的引用。内容包括仿人机器人学的运动学、ZMP 和动力学、双足步态规划和全身运动模式的生成和动力学仿真等，是对 10 多年来仿人机器人

* 几乎与此同时，日本的稻叶教授也出版了一部与仿人机器人有关的著作“Robot Anatomy” (Iwanami Robotics Series no. 7, 日文版)。南斯拉夫的 Wukobratovic 教授等人在 16 年前出版过有关双足步行的专著：“Biped Locomotion Dynamics, Stability, Control and Applications”, Springer-Verlag, 1990。

的研究成果(尤其是作者们的成果)的总结,在一定程度上反映了当今世界在仿人机器人上的最新发展和水平。这本学术专著并不是纯理论介绍,几乎所有的理论和算法都有实际机器人系统和平台的支持,书中图文并茂、深入浅出、内容生动。

本书的日文原著由四位作者共同写就,每位作者撰写其最擅长的专题。几位作者都是产业技术综合研究所属下的智能系统研究所仿人机器人 HRP-2 研发小组的主要成员。《仿人机器人》是他们多年的学术研究和系统开发的概括。除日文原著外,还计划推出英文、中文(即本书)、法文和德文版本,以五种文字向全世界出版发行。如果本书在中国的出版能对我国的机器人研究和开发有所启发、帮助和推动,那么译者的初衷和愿望也就实现了。

本书的翻译主要基于英文手稿,并参考了日文原著。在翻译过程中,译者随时与作者商讨,力求翻译准确到位。尽管如此,因译者的水平和时间所限,译文中难免会有不妥甚至错误之处,欢迎读者批评和指正。

管贻生

2006 年 8 月于日本筑波

前言

今天在电视和展示会看到仿人机器人像真人一样行走和跳舞,各种各样的机器人表演令人叹为观止。很多人不禁好奇,“那些动作是怎样实现的呢?”本书的首要目的就是回答这个问题。本书介绍的理论和技术已经实际应用于我们的仿人机器人 HRP-2 的控制,类似的技术也应用在其他诸如本田的 ASIMO 和索尼的 QRIO 等著名的仿人机器人上。

乍看起来,书中内容并不简单,对那些头痛于数学的人而言本书的方程式数量多得令人生畏。为了克服数学算式的枯燥乏味,使它们形象生动,我们尽可能地加插了照片和图形。事实上,这是一些用数学语言和物理语言仔细谱写的“乐谱”,隐藏在仿人机器人令人赞叹的表演背后。我们希望本书能引起更多的人对仿人机器人感兴趣并认识到科学和技术是构筑现代社会的支柱。如果这个目的能达到,那么本书的写作就获得了成功。

本书第 1 章由产业技术综合研究所属下的智能系统研究所仿人机器人研究室主任比留川博久(Hirohisa Hirukawa)执笔,第 3 章由同一研究室的研究员原田研介(Kensuke Harada)和梶田秀司(Shuuji Kajita)共同执笔,第 5 章由同所的自主行为控制研究室主任横井一仁(Kazuhito Yokoi)执笔,其他第 2、4、6 章由梶田秀司执笔。

若没有其他很多人的帮助本书是难以出版的。首先感谢川田工业株式会社航空和机械事业部的川田忠裕、五十俵隆勝和其他优秀的工程师,他们设计制造了包括仿人机器人

HRP-2 在内的硬件平台。感谢 General Robotix 株式会社的小神野东贤和川角祐一郎,他们为我们负责机器人的维护保养。我们还感谢同一研究室的金子健二、金广文男、藤原清司、斋藤元和森泽光晴等,他们做出了很多优秀的研究成果。本书的内容主要是仿人机器人研究室全体人员的研究成果,该室研究人员还对书稿提出过有益的建议。同所的分布系统设计研究室主任黑河治久在最后阶段对书稿提出过重要建议,筑波大学研究生院学生长崎高已指出了原稿中的一些错误。若本书有所价值,则应归功于上述各位人士。当然,对书中可能存在的错误,不由分说由著者负责。

最后感谢智能系统研究所所长平井成兴(Shigeoki Hirai)和前所长谷江和雄(Kazuo Tanie)。若没有他们的管理以维持一个良好的研究环境,本书也就难以问世。

梶田秀司
2005 年 3 月

目 录

第 1 章 仿人机器人概论	1
第 2 章 运动学	15
2.1 坐标变换	15
2.1.1 世界坐标系	15
2.1.2 局部坐标系和齐次变换	17
2.1.3 局部坐标系之间的相对性	19
2.1.4 齐次变换的链乘法法则	21
2.2 转动特性	21
2.2.1 滚动、俯仰和偏摆	22
2.2.2 旋转矩阵的含义	23
2.2.3 旋转矩阵的逆阵	24
2.2.4 角速度矢量	25
2.2.5 旋转矩阵的微分与角速度矢量	28
2.2.6 角速度矢量的积分与矩阵指数之间的关系	30
2.2.7 矩阵的对数	31
2.3 三维空间中的速度	32
2.3.1 单个物体的速度和角速度	32
2.3.2 两个物体的速度和角速度	34
2.4 机器人的数据结构和编程	36
2.4.1 数据结构	36
2.4.2 用递归方法编程	38
2.5 仿人机器人的运动学	41

2.5.1	模型的建立	41
2.5.2	由关节角求连杆的位姿: 正运动学	44
2.5.3	由连杆的位姿求关节角: 逆运动学	47
2.5.4	逆运动学的数值解法	50
2.5.5	雅可比	54
2.5.6	关节速度、连杆的速度和角速度的计算	57
2.5.7	奇异姿态	58
2.5.8	附录: 辅助函数	59
第3章	ZMP 和动力学	61
3.1	ZMP 和地面反作用力	61
3.1.1	ZMP 概述	61
3.1.2	二维分析	63
3.1.3	三维分析	66
3.2	ZMP 的测量	70
3.2.1	一般情况	70
3.2.2	单脚 ZMP	71
3.2.3	考虑双足时的 ZMP	75
3.3	仿人机器人的动力学	76
3.3.1	仿人机器人的运动和地面作用力	77
3.3.2	动量	79
3.3.3	角动量	80
3.3.4	刚体的角动量和惯性张量	82
3.3.5	机器人质心的计算	85
3.3.6	机器人动量的计算	86
3.3.7	机器人角动量的计算	87
3.4	基于机器人运动的 ZMP 计算	87
3.4.1	ZMP 的推导	88
3.4.2	ZMP 的近似计算	89
3.5	对 ZMP 的几点说明	91

3.5.1	两种解释	91
3.5.2	因质心加速度的影响 ZMP 可在支撑 多边形之外吗	91
3.5.3	ZMP 的局限性	94
3.6	附录: 凸集和凸包	95
第 4 章	双足步行	97
4.1	怎样实现双足步行	98
4.2	二维步行模式的生成	99
4.2.1	二维倒立摆	99
4.2.2	线性倒立摆的运动特性	103
4.2.3	轨道能量	105
4.2.4	支撑脚的切换	107
4.2.5	简单的双足步态规划	109
4.2.6	向凸凹路面上的推广	110
4.3	三维步行模式的生成	114
4.3.1	三维线性倒立摆	114
4.3.2	三维线性倒立摆的特性	116
4.3.3	三维步行模式的生成	120
4.3.4	双足支撑阶段的引入	129
4.3.5	从线性倒立摆到多连杆模型	131
4.3.6	在实际机器人上的应用举例	131
4.4	基于 ZMP 的步行模式生成	134
4.4.1	桌子-小车模型	134
4.4.2	步行模式的离线生成	136
4.4.3	步行模式的在线生成	138
4.4.4	基于预观控制的动力学过滤器	144
4.5	步行稳定器	147
4.5.1	步行稳定控制的基本原理	148
4.5.2	Honda 仿人机器人的稳定控制	152

4.6	双足动态步行技术的先锋	154
4.7	双足动态步行的其他实现方法	156
4.7.1	被动步行	156
4.7.2	非线性振摆和 CPG	156
4.7.3	学习和进化算法	157
第5章	全身运动模式的生成	159
5.1	怎样生成全身运动模式	159
5.2	粗略的全身运动模式的生成方法	162
5.2.1	基于运动捕获的生成法	163
5.2.2	基于 GUI 的生成法	163
5.2.3	多维空间高速搜索法	165
5.3	保证稳定性的全身运动模式的变换方法	165
5.3.1	动力学过滤器	166
5.3.2	自动平衡器	167
5.3.3	躯干轨迹补偿算法	168
5.4	仿人机器人全身运动的远程操作	170
5.4.1	基于操作点切换的全身运动远程指令法	171
5.4.2	基于分解动量控制的全身运动生成	173
5.4.3	在仿人机器人 HRP-2 上的实现和 实验	175
5.5	仿人机器人向后摔倒的缓冲动作	178
5.6	仿人机器人摔倒后的恢复动作	181
第6章	动力学仿真	185
6.1	转动刚体的动力学	186
6.1.1	Euler 运动方程	186
6.1.2	刚体转动的仿真	187
6.2	空间速度	189
6.2.1	空间速度的定义	189
6.2.2	空间速度的积分	191

6.3	刚体动力学	193
6.3.1	Newton-Euler 方程	193
6.3.2	基于空间速度的动力学	194
6.3.3	基于空间速度的刚体运动仿真	195
6.3.4	陀螺运动仿真	197
6.4	刚体连杆系统的动力学	199
6.4.1	考虑加速度的正运动学	200
6.4.2	刚体连杆系统的逆动力学	202
6.4.3	刚体连杆系统的正动力学	205
6.4.4	动力学的 Featherstone 方法	207
6.5	本章的背景和杂谈	210
6.6	附录	211
6.6.1	力和力矩	211
6.6.2	子程序和函数	212
参考文献		216
索引		225

仿人机器人概论

仿人机器人是一种外形像人的机器人。由于科学幻想小说和电影中的机器人大多数都具有人的形状,因此在很多人的想像中机器人都像人一样。另一方面,正如飞机未必具有鸟的形状一样,很难断定说机器人都应该是在现实世界中能执行各种任务的仿人机器人。机器人的最佳形态应该取决于对机器人的功能要求。

在探讨什么是机器人的最佳形态之前,需要明确我们对机器人有何期望。由于汽车既能满足人们远行的需要,又能使人们享受到驾驶的乐趣,从而成为 20 世纪最大的产品。那么,人们对机器人的期望又是什么呢?我们希望机器人是既能够做人所不愿做的工作又能与人们进行交流的伙伴。考虑到机器人功能的实现,仿人机器人应该具有下列三个特征:

1. 能在人们所处的现实环境中工作;
2. 能使用人们所用的工具;
3. 具有人的形状。

首先考虑第一个特征。现代社会的环境是为人类自身设计的,例如,走廊的宽度、阶梯的高度、扶手的位置和门把的位置等数不胜数的事物都要适合人的尺寸和运动。因此,当机器人具有人的形状并能像人一样活动时,就不需要为机器人而改变人的环境。而对于轮式移动机器人等非人形机器人的运动,障碍物需要清除、狭窄的走道需要扩宽、电梯或升降机需要准备好,这些都需要额外的花销。开发仿人机器人比修改整个环境显得更经济合理。

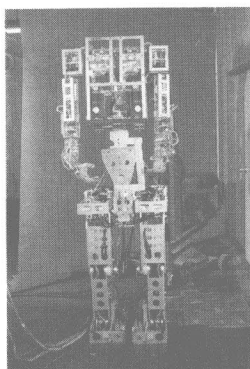
第二个特征具有类似的效果。人类在社会文明活动中设计了适合于自己使用的各种各样的工具。例如,椅子的形状和高矮适合于坐,桌子的高度适合于吃饭或写字,司机的座椅便于驾驶,起子或剪刀适合于手指操作。这些工具可被仿人机器人直接使用而不需要作任何修改。使用仿人机器人比为非人形机器人重新设计制作各种各样的工具来得经济些。

类似的讨论可见于艾萨克·阿西莫夫(Issac Asimov)的小说《钢窟》(The Caves of Steel)。小说中一位著名的教授解释了为什么机器人应该是仿人的,其结论与我们的相同。坦率地说,我们花了很长时间才得到这个结论。令人惊奇的是,同样的结论早在 50 多年前的小说中就得出。

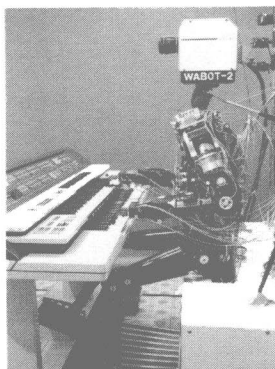
第三个特征涉及人的亲近感。当一个机器人看起来与人自身形状一样时,它就很容易“拟人化”。机器人的形状与人相差越大,人们就越觉得它不具“人性”而只是一个机器。观看双足仿人机器人跳舞是件赏心悦目的事,而轮式移动机器人的舞蹈就逊色得多,没有多少观赏性和吸引力。“具有人的形状”对于使机器人成为人们的伙伴并为人们带来乐趣是个非常重要的因素。这个特征应该是科幻小说和电影中很多机器人都像人的主要原因。

现实世界中最早出现的仿人机器人应该首推 1973 年早稻田大学加藤一郎研究室开发的 WABOT-1。尽管技术还不很成熟, WABOT-1 却既能通过视觉识别物体,也能通过听觉和语音合成与人进行语言交流,还能用有触觉的双手对物体进行操作,能够用双足行走,几乎具备仿人机器人的所有功能和组成要素。其后,早稻田大学同一个研究室又开发了能演奏钢琴的仿人机器人 WABOT-2,并于 1985 年在日本筑波科学博览会上公开展示。WABOT-1 和 WABOT-2 的外观如图 1.1 所示^[2]。

仿人机器人的新纪元是由本田在 1996 年推出令人惊叹的 P2 掀开的。就在 WABOT-2 演奏钢琴之后一年,本田技研从 1986 年开始实施一项仿人机器人研发的秘密计划,终于在 1996 年推出身



WABOT-1 (1973)

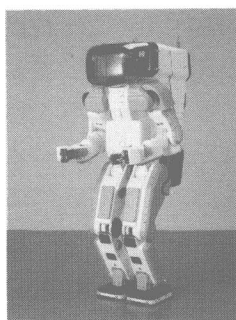


WABOT-2 (1984)

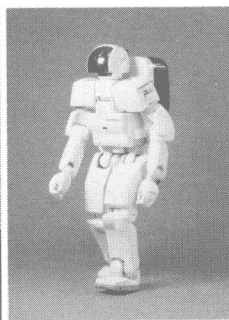
图 1.1 早稻田大学的仿人机器人

(图片来源:早稻田大学 仿人机器人研究所)

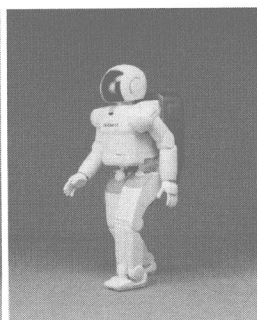
高 180cm、体重 210kg 的仿人机器人 P2。P2 身上搭载计算机和电池,是世界上首台能用双足稳定步行的仿人机器人。此后,本田又于 1997 年发布了高 160cm、重 130kg 的 P3,在 2000 年推出高度仅 120cm、重量仅 43kg 的 ASIMO,向小型化迈进。这三款机器人的外观如图 1.2 所示。



P2 (1996)



P3 (1997)



ASIMO (2000)

图 1.2 本田的仿人机器人

(图片来源:本田技研)

在 P2 诞生之前,机器人行业内多数人对开发能稳定步行的双足仿人机器人持悲观的态度。这正是本田 P2 令人震惊的原因所在。那么,P2 与以前传统的仿人机器人之间有什么主要的不同呢?我们首先考虑硬件方面。

在大学研究室开发的早期仿人机器人大多数由研究生手工制作,或者由小工厂制造。机器人的连杆等零部件通过人工弯曲、切割和其他敲敲打打等手段制成,这样机器人的整体结构缺乏足够的刚度。而减速机构则多由重量大、齿隙大的齿轮组成。与此相对的是,本田机器人的步行机构采用合金铸造的刚度大、重量轻的连杆。这样的制造技术对大学研究项目来说花费太大而难以承受。本田仿人机器人还采用谐波减速驱动,消除了传动背隙。由于常规的谐波减速器传递的扭矩不太大,难以应用于双足步行,本田就开发了大扭矩的谐波减速器。在设计上,本田采用先进的计算机辅助设计,并用有限元方法对构件进行三维分析。上述高刚性连杆和谐波减速驱动的采用成为后来开发大小与人相似的仿人机器人的结构范本。

再考虑机器人的传感器。即便期望的步行模式在规划中是稳定的,在实际的机器人双足步行时由于外界的干扰而有可能不稳定。这就需要利用适当的传感器信息作反馈控制以保证步行的稳定性。早先的仿人机器人没有装备足够的传感器,而本田机器人则装有加速度计和姿态传感器(陀螺仪)用以检测机器人躯干的姿态,六维力/力矩传感器用以检测脚与地面之间的力/力矩。以前的操作机的末端执行器也常装备有力传感器,但没有传感器能够耐受比人还重的机器人步行时与地面的冲击。本田技研专门开发了适合于双足步行机器人的六维力/力矩传感器。利用加速度计和陀螺仪对姿态进行检测和利用多维力/力矩传感器检测地面的反作用力/力矩也成为后来仿人机器人的参考标准。

本书的目的在于介绍为具备上述硬件配置的仿人机器人开发控制软件所需要的理论基础。

第2章概述仿人机器人的运动学,即机器人运动的描述。作为理论基础,先介绍三维空间中物体转动的描述方法、角速度矢量、旋转矩阵的微分与角速度矢量之间的关系。然后阐述根据给定的各关节角求机器人的手或足等连杆的位置和姿态的方法,即机器人正运动学。接着说明怎样根据给定的连杆位姿(位置和姿态)求机器人相应的关节角,即机器人逆运动学求解和计算。逆运动学问题的一个例子如图1.3所示。给定如图1.3(a)所示的双足机器人初始位姿,当右脚抬高0.3m并绕 y 轴转动 20° ,如图1.3(b)所示,求对应的关节角。

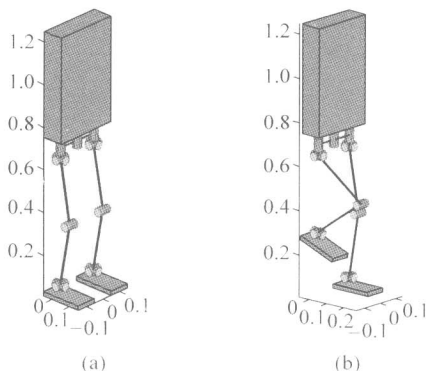


图1.3 双足步行机器人的逆运动学求解举例

(a) 初始姿态; (b) 右脚抬起0.3m, 沿 y 轴转动 20°

一般而言,由于机器人的大多数关节是转动型的,关节角和连杆位姿(位置和姿态)之间的关系往往用非线性方程表示。逆运动学问题本来可以通过求得非线性方程组的解析解而解决,然而对于这些高次多变量的非线性方程组,其解析解一般不太可能求得。好在考虑这些非线性方程组的微分时,连杆位姿的微变化与关节角微变量之间的关系是线性的。这样可以通过求解线性方程组得到对应于连杆位姿微变化的关节角微变量,再积分就得到逆运动学问题的解。这些线性方程组的系数矩阵叫做雅可比矩阵(简称