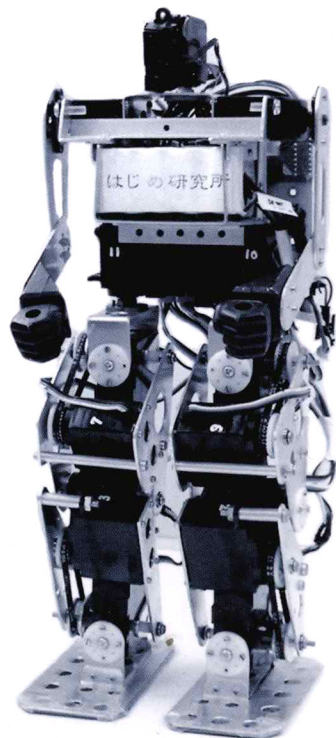


双足步行 机器人 进化技术

[日] ROBO-ON

刘继红 译
杨洋 审校



 科学出版社

双足步行机器人进化技术

[日] ROBO-ONE委员会 编
刘继红 译
杨 洋 审校

科学出版社

北京

图字：01-2011-7157号

内 容 简 介

本书以日本 ROBO-ONE（双足步行机器人格斗竞技大赛）为背景，全面系统地介绍了双足步行机器人的相关技术，包括机器人硬件结构、机器人开发环境、机器人软件及其编程、无线通信、人机界面等内容。内容新颖，案例丰富，实用性强，寓教与学于乐。

本书既可作为机器人初学者掌握机器人制作知识的入门书，也可作为机器人研究者钻研机器人制作新技术的参考书，适合从高中生到研究生的不同知识水平的读者。

图书在版编目（CIP）数据

双足步行机器人进化技术/（日）日本ROBO-ONE委员会编；刘继红译；杨洋审校.—北京：科学出版社，2012

ISBN 978-7-03-035752-6

I.双… II.①日…②刘…③杨… III.机器人技术 IV.TP24

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第239913号

责任编辑：孙力维 杨 凯 / 责任制作：董立颖 魏 谨

责任印制：赵德静 / 封面设计：林一帆

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张：13 3/4

印数：1—5 000 字数：260 000

定价：38.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）





译者序

继本田的ASIMO、索尼的SDR和富士通的HOAP-2等人形机器人问世以来，人形机器人给我们带来了梦想。现在市面上已经出现了双足步行机器人玩具，我国的一些中小学也结合实践教学课程的要求配备了双足步行机器人本体和相应的控制平台。经过编程，双足步行机器人可以站立、行走，有些还可以跳舞、唱歌。有兴趣从事机器人制作的朋友们，可能一直在琢磨：我们自己能否亲手制作、控制机器人？现在的机器人是否可以实现更复杂且难度大的动作？能否像动画片中的超人那样飞翔？

ROBO-ONE是实现这种梦想的双足步行机器人大赛。越来越多的人追逐梦想、制作机器人并挑战ROBO-ONE。系列书《双足步行机器人制作指南》《双足步行机器人进化技术》《双足步行机器人仿真设计》就是在这样的背景下出版的。该系列书由ROBO-ONE委员会组织编写，以参加ROBO-ONE的双足步行机器人为题材，由日本著名的机器人专家和往届优胜者执笔。

本系列书以参加ROBO-ONE的双足步行机器人为对象，全面介绍机器人硬件选型制作、机器人动作（运动）创建（程序）、无线通信及控制器。同时，引入协同仿真技术，利用CAD软件、分析软件及控制和仿真软件，构建机器人仿真环境，讲述仿真过程和方法。还邀请历届ROBO-ONE的获奖机器人制作者，向想要参加ROBO-ONE及想要制作双足步行机器人的人们解说艰苦而富有乐趣的双足步行机器人的制作历程。

本系列书旨在为高中生以上正考虑制作机器人、正在制作机器人或虽有机器人制作经验但仍想挑战独创的机器人的各位读者提供一个学习和交流的平台，帮助大家了解和学习双足步行机器人的设计、制作、动作控制及仿真方面的知识，培养学习者的动手技能，提高设计制作水平。尤其是怀有梦想的机器人爱好者，能够从中收获机器人制作的知识，使他们如虎添翼，实现梦想、迎接挑战。

本系列书系统性强，从简单的机器人零部件的设计、制作到整体机器人的装配和运动控制构成完整的体系，贯穿以硬件制作实际机器人和通过软件进行机器人设计、分析及控制仿真的手段和方法。本丛书图文并茂、简明易懂，不涉及抽象的理论，实用性强，是目前我国机器人爱好者不可多得的参考书，可望对提高我国的机器人技术水平、推动机器人技术的普及有一定的贡献。

值此译稿付梓之际，我谨向百忙中拨冗执迷的各位译者，向编辑出版该系列书的科学出版社有关编辑，以及日本欧姆社和ROBO-ONE委员会的各位表示诚挚的谢意。

由于书中涉及的内容广泛，译者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

杨洋

2012年10月30日



前言

本书是《双足步行机器人制作指南》的续篇，以参加ROBO-ONE（双足步行机器人格斗竞技大赛）的机器人为题材，全面介绍机器人硬件制作、机器人动作（运动）生成（程序）、无线通信操控及控制器等内容。

本书不仅介绍了串口型伺服电机和各种传感器的构造及其装机方法，同时介绍了对于机器人运动有着重要作用的传感器的控制方法。双足步行机器人的初学者可以通过学习本书掌握正确制作运动机器人的知识，而对于双足步行机器人的制作已有一定经验的读者，则可以通过阅读本书进一步提高制作水平。

书中针对ROBO-ONE竞赛参赛者所提供的制作实例，重点介绍机器人腿部或手部等有特点的结构部分，读者在自己动手制作机器人时可以参考借鉴。

对于具有高中学历，考虑制作机器人、正在制作机器人、具有机器人工具包制作经验想挑战制作独创性机器人的年轻人来说，本书是必读书。而且，本书也请来了ROBO-ONE竞赛往届冠军或取得好名次的机器人制作者加入执笔者阵容。

读者在实际制作双足步行机器人时，如果一边参考《自律型机器人制作宝典》《双足步行机器人制作指南》《双足步行机器人仿真设计》等书籍，一边阅读本书的话，理解应该会更加深刻。

另外，ROBO-ONE竞赛委员会通过举办ROBO-ONE技术会议，尽量让所有参赛者公开其关于机器人制作的相关技术。具体资料可以从ROBO-ONE竞赛官方网站（<http://www.rob-one.com>）下载，敬请阅读。

现在就开始自己动手制作机器人吧。每当机器人完成一个新的动作，你都会由衷为之感动。让铁臂阿童木成为现实的，也许就是你！

梦想，感动，然后成真。

ROBO-ONE委员会代表 西村辉一



目录

第 1 章 ROBO-ONE 介绍	1
1.1 ROBO-ONE 大赛的魅力	2
1.1.1 引 言	2
1.1.2 ROBO-ONE 简介	2
1.1.3 ROBO-ONE 的诞生	2
1.1.4 正式迈向业余爱好机器人：KHR-1 的诞生	3
1.1.5 ROBO-ONE 更进一步的发展	3
1.1.6 ROBO-ONE 大赛的历史 ^[2]	4
1.1.7 追求新功能	5
1.1.8 参加者范围扩大	5
1.1.9 仿人机器人	6
1.1.10 宇宙应用	6
1.1.11 抛掷站立	7
1.1.12 仿 真	8
1.1.13 基于模型的集成开发 ^[6]	9
1.1.14 培养技术人员	9
1.1.15 结 语	9
参考文献	9
1.2 ROBO-ONE 竞赛规则及未来发展	10
1.2.1 引 言	10
1.2.2 ROBO-ONE 机器人的规格要求	10
1.2.3 预 赛	11
1.2.4 机器人格斗竞技的技法	12
1.2.5 结 语	15
参考文献	15

第 2 章 双足步行机器人部件的结构	17
2.1 电子元器件	18
2.1.1 引 言	18
2.1.2 电阻器	18
2.1.3 电容器	18
2.1.4 线 圈	19
2.1.5 二极管	20
2.1.6 LED.....	20
2.1.7 晶体管	21
2.1.8 光电晶体管	21
2.1.9 TTL集成电路与逻辑电路.....	22
2.1.10 运算放大器	22
2.1.11 三端子稳压器	23
2.1.12 RS485驱动器集成电路	23
2.1.13 扩音器	23
2.1.14 按钮开关	24
2.1.15 结 语	24
2.2 传感器	24
2.2.1 引 言	24
2.2.2 角度传感器	24
2.2.3 超声波传感器	25
2.2.4 光电传感器	26
2.2.5 PSD距离传感器.....	26
2.2.6 人体传感器	28
2.2.7 陀螺仪传感器	29
2.2.9 重力加速度传感器/加速度传感器	30
2.2.10 FSR（力传感器）	30
2.2.11 压力传感器	31
2.2.12 结 语	32
参 考 文 献	32
2.3 伺服电机	32
2.3.1 引 言	32
2.3.2 无线遥控用伺服电机	33

2.3.3	机器人用串口型伺服电机	33
2.3.4	串口通信	34
2.3.5	伺服电机的位置控制	34
2.3.6	Dynamixel伺服电机控制表	36
2.3.7	Dynamixel协议	38
2.3.8	近藤科学生产的串口型伺服电机	40
2.3.9	双叶电子工业生产的指令式伺服电机	41
2.3.10	伺服电机的特性	42
2.3.11	串口通信型伺服电机的电源线	44
2.3.12	结 语	45
	参考文献	45
2.4	借助LabVIEW活用传感器	45
2.4.1	引 言	45
2.4.2	关于LabVIEW ^[1]	46
2.4.3	Dynamixel配置器	46
2.4.4	RS485通信微处理器基板	46
2.4.5	用重力加速度传感器求取角度	47
2.4.6	智能超声波传感器	48
2.4.7	超声波距离传感器	48
2.4.8	PSD距离传感器	49
2.4.9	力觉传感器	51
2.4.10	机器人用伺服电机角度精度的验证方法	52
2.4.11	机器人用伺服电机瞬态特性的测量方法	52
2.4.12	机器人用伺服电机转矩的测量方法	53
2.4.13	脚底传感器的调整方法	53
2.4.14	结 语	53
	参考文献	54
2.5	电 池	54
2.5.1	二次电池	54
2.5.2	锂离子电池的工作原理	54
2.5.3	锂离子电池的构造	55
2.5.4	锂离子电池的特点	55
2.5.5	锂离子电池的处理	55
2.5.6	对锂离子电池的冲击	56

2.5.7	锂离子电池的外部短路	56
2.5.8	锂离子电池的充电	56
2.5.9	锂离子电池的放电	57
2.5.10	锂离子电池的保管	57
2.5.11	锂离子电池的特性	58
	参考文献	58
第 3 章	机器人开发环境	59
3.1	概 述	60
3.2	编程工具	60
3.2.1	GCC Developer Lite	60
3.2.2	LabVIEW	62
3.3	机器人用控制器	63
3.4	ROBO-ONE对硬件的要求	65
3.4.1	电 机	65
3.4.2	控制器	66
3.5	以PC为主机的程序	66
3.5.1	使用带串口I/F的PC启动电机之前	66
3.5.2	GCC Developer Lite和Dynamixel Windows库的准备	67
3.5.3	Dynamixel Windows库的雏形与编译方法	67
3.5.4	用DXLIB2驱动电机	69
3.5.5	通过LabVIEW使用DXLIB2	75
3.6	以机器人用控制器为主机的程序	76
3.6.1	使用Dynamixel库	77
3.6.2	使用FREEDOM III库	78
3.7	结 语	78
第 4 章	双足步行机器人的开发软件	79
4.1	机器人编程基础	80
4.1.1	引 言	80
4.1.2	双足步行机器人的设计	80
4.1.3	双足步行机器人系统	80
4.1.4	自律神经系统	81

4.1.5	FREEDOM jr.III的准备	81
4.1.6	驱动双足步行机器人的编程	86
4.1.7	结 语	99
	参考文献	99
4.2	机器人的控制程序	99
4.2.1	引 言	99
4.2.2	陀螺仪传感器	99
4.2.3	脚底传感器的使用方法	101
4.2.4	倾斜传感器控制	104
4.2.5	轮廓控制	104
4.2.6	超出控制范围时的处理	105
4.2.7	结 语	105
	参考文献	105
4.3	利用MATLAB Simulink Embedded Coder进行编程	105
4.3.1	引 言	105
4.3.2	双足步行机器人的逆运动学	106
4.3.3	双足步行模式的生成	106
4.3.4	生成C语言代码	108
4.3.5	结 语	111
	参考文献	111
第 5 章	无线通信	113
5.1	概 述	114
5.2	Wi-Fi	114
5.3	WWAN	115
5.4	蓝 牙	116
5.5	2.4GHz波段无线设备	118
5.6	结 语	119
第 6 章	人机界面	121
6.1	机器人的控制方法	122
6.1.1	控制终端的种类与特点	122
6.1.2	机器人指令的内容	124
6.1.3	机器人控制的基础	125

6.1.4	对应ROBO-ONE竞技大赛的操作方法	125
6.2	主从控制	126
6.2.1	主从控制的特点	126
6.2.2	主从控制装置的制作	129
6.3	其他控制方法	133
6.3.1	PC控制 (GUI)	133
	参考文献	139
6.3.2	使用Wii控制器的控制	139
	参考文献	143
6.3.3	使用iPhone的控制	143

第 7 章 双足步行机器人制作示例149

7.1	钢铁战士的制作	150
7.1.1	引言	150
7.1.2	第一步: 学习市面上出售的工具包	150
7.1.3	第二步: 改造市面上出售的工具包	151
7.1.4	第三步: 挑战独创的机器人	152
7.1.5	第四步: 制作运动部分	161
7.1.6	结语	163
7.2	TokoToko号的制作示例	163
7.2.1	TokoToko号简介	163
7.2.2	机构设计概要	167
7.2.3	步行运动部分	168
7.2.4	结语	171
7.3	能抓握物品的手部结构 (DokaHarumi)	171
7.3.1	双足步行机器人的手	171
7.3.2	手指的结构	172
7.3.3	能捕球的手	172
7.3.4	拿鸡蛋的手	175
7.3.5	开启瓶盖的手	180
7.3.6	结语	183
7.4	大型机器人的构造 (OmniZero)	183
7.4.1	机器人的大型化	183
7.4.2	框架强度	188

7.4.3	安全性	190
7.4.4	制作示例 (OmniZero.7)	191
7.4.5	制作示例 (OmniZero.9)	192
7.5	“凯撒王” 机器人制作示例	193
7.5.1	引 言	193
7.5.2	“凯撒王” 系列机器人	193
7.5.3	轻量级机器人	197
7.5.4	能在ROBO-ONE大赛取胜的机器人	202
7.5.5	结 语	203

第 1 章

ROBO-ONE 介绍

西村 辉一 ROBO-ONE委员会主席。



1.1 ROBO-ONE大赛的魅力

1.1.1 引言

ROBO-ONE^[1]机器人竞技大赛始于2002年。当时,还没有人想到双足步行机器人能够进行格斗。但是现如今,双足步行机器人行进、快跑,都已经是司空见惯的事情。

另外,日本各地几乎每月都会举办双足步行机器人业余竞技大赛,特别是低价位机器人的出现,加速了双足步行机器人的普及。

1.1.2 ROBO-ONE简介

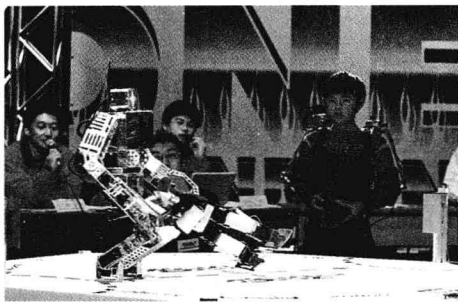


图1.1 ROBO-ONE大赛会场

ROBO-ONE是双足步行机器人格斗竞技大赛,目的是通过格斗竞赛来提高双足步行机器人的技术。图1.1所示是ROBO-ONE大赛会场的场景。

ROBO-ONE大赛也注重培养机器人技术的研发人员。当时,日本的研发人员常常被认为与其他国家的技术人员相比总是不愿表达自己的思想,所以需要提供机会让参赛者在预选赛的机器

人展示环节介绍自己的技术思想。例如,预选赛通过设置类似“至少能跑起来”等意义模糊的课题,试图使得被条条框框制约的日本机器人技术开发模式向开放创新的技术开发模式转变。并不是所有能够跑起来的机器人都可以通过预选赛,而是要求必须进入前32名,所以参赛者必须致力于提高机器人的跑动技能。

决赛采用淘汰制,比赛内容是格斗竞赛。打个比方,在预选赛靠体操动作胜出的选手,在决赛阶段必须拿出职业摔跤的本事。

目前,机器人活跃于各种场合,需要具备各种各样的功能。特别是,人们期待双足步行机器人能够具有优于人类的某些能力。这样的能力正一点一点地得以实现,设计人员从中获得成就感,这种成就感又成为人们继续前进的动力。

1.1.3 ROBO-ONE的诞生

ROBO-ONE机器人竞技大赛来源于“让双足步行机器人进行格斗竞赛”的想法,机器人爱好者制作机器人,并通过互联网交流信息,这就催生了ROBO-ONE大赛。图1.2所示的双足步行机器人在最初举办FREEDOM ROBO-ONE大赛时,是作为参加者的学习教材出售的。

该机器人拥有24个自由度,CPU采用16位微处理器。伺服电机采用无线电通信控制,最大扭矩可达13.5kgf·cm。采用PWM信号,通过微处理器的I/O端口接入各个伺服

电机，从而实现伺服控制。由于可以一边进行逆运动学计算，一边走，所以可以实现一边进行三角函数计算，一边走。

该机器人是日本首款售价40万日元以下的低价位双足步行机器人。相关技术在《双足步行机器人制作指南》（原书2004年5月出版）一书中有详细介绍。由此，ROBO-ONE大赛借助技术信息的公开取得了较大发展。通过举办技术交流会议，使得优秀的参加者的机器人技术得以公开，并由ROBO-ONE大赛委员会汇编成书^[2,3]。这些工作不仅使得机器人制作更为容易，同时也吸引了更多的参赛者。

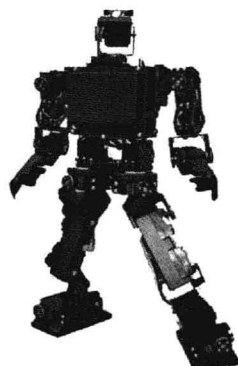


图1.2 FREEDOM

1.1.4 正式迈向业余爱好机器人：KHR-1的诞生

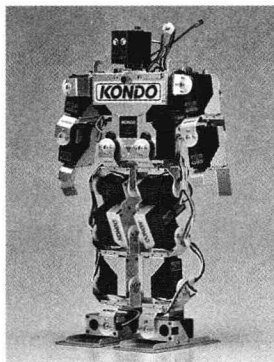


图1.3 KHR-1

在ROBO-ONE大赛上，大转矩的伺服系统被越来越多的设计人员采用。在无线电遥控汽车上不常用的大转矩伺服系统很快销售一空。当存货不多时，无线电遥控器生产厂商的负责人亲自进行调查。后来，他参加了ROBO-ONE大赛委员会主办的“技术大会”，并听取了机器人制作者的意见，推出了图1.3所示的业务爱好型机器人KHR-1。KHR-1的后代机型KHR-2HV在2006年的“年度机器人”有奖竞赛中获得了“中小企业特别奖”。

在KHR-1之后，众多的无线电遥控器生产厂商加入了面向ROBO-ONE大赛的业余爱好机器人的开发行列。

1.1.5 ROBO-ONE更进一步的发展

伺服电机的进化对于双足步行机器人而言非常重要。无线电遥控汽车中的伺服电机和机器人用的伺服电机有明显区别。ROBO-ONE大赛通过加大预赛规定表演的难度，来进一步完善机器人适用的伺服电机，特别是加大伺服电机的转矩。伺服电机转矩增大与发展大型机器人密切相关。早期伺服电机的最大转矩为 $13.5\text{kgf}\cdot\text{cm}$ ，现在有的伺服电机转矩已超过 $100\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 。

图1.4中的Dynamixel RX-64是实现了RX-485标准串口通信的大转矩型伺服电机。串行化使得伺服电机中温度、电流、转矩、电压、控制参数等信息的通信量大幅增加，实现了1Mbps的高速通信。而且，动作智能化、监控应对等功能也使得该伺服电机越来越适用于机器人。

正是因为适用于机器人的伺服电机不断进化，机器人已经能够完成图1.5所示的快跑、跳跃、跳绳等各种各样的动作。这种进步是ROBO-ONE大赛、伺服电机生产厂商和大赛参与者共同努力的结果。



图1.4 Dynamixel RX-64

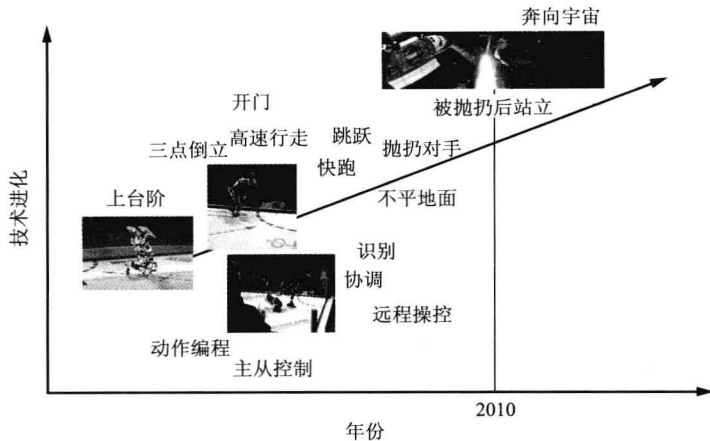


图1.5 机器人动作的进化

本书还将介绍这些不断进化的无线设备的有效使用方法。

1.1.6 ROBO-ONE大赛的历史^[2]

最初的ROBO-ONE大赛，有30台左右机器人参加，而其中只有少数机器人能够步行。参赛机器人的数量虽然逐年大幅增加（图1.6），但是近年来，从观战者角度考虑，应该严格审查参加资格，将参加机器人限制在100台以下。例如，增加了坡道步行等需要高级控制技术的审查条件，在某种程度上控制了参加人数。

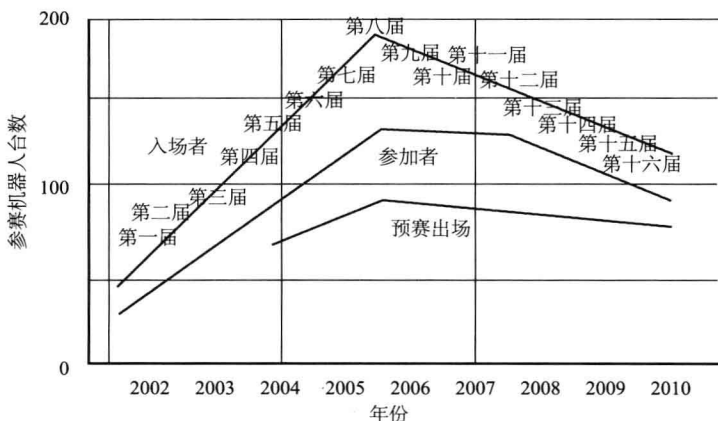


图1.6 参赛者逐年增加

即便如此，勇于挑战高级技术的人仍不断增加，挑战者越来越多。

今后，不仅要坚持和发扬ROBO-ONE大赛的魅力，同时还要完善相关比赛环境。

正是因为有广大参赛者的支持，ROBO-ONE大赛才得以不断发展。特别是重视娱乐性的、能做出令人耳目一新动作的机器人技术，实现了很大进步。

另外，在满足机器人动作要求的伺服电机以及转矩提升方面，ROBO-ONE大赛也做出了巨大贡献。今后考虑要向轻量化、实用化方向努力。