

# 双足步行 机器人 制作指南

[日] ROBO-O

李端玲 刘天娇 徐清雪 洪娟 译  
杨洋 审校



# 双足步行机器人制作指南

〔日〕 ROBO-ONE委员会 编  
李端玲 刘天娇 徐清雪 洪娟 译  
杨洋 审校

科学出版社

北京

图字：01-2011-7155号

## 内 容 简 介

本书主要介绍了一些机器人爱好者是如何通过 ROBO-ONE 大赛实现自己制作双足步行机器人的梦想并不断挑战机器人新技术的过程。全书共分 8 章，首先，介绍了 ROBO-ONE 大赛，它为大家提供了一个机器人的展示和交流平台；其次，详细地介绍了如何制作 ROBO-ONE 比赛用智能机器人 FREEDOM，包括结构设计、开发环境、伺服电机选型、仿真分析、步行模式及传感器等；最后，介绍了在 ROBO-ONE 大赛中表现出色的几款机器人的制作过程和作者的心得体会。

本书为广大机器人爱好者打开一扇实现梦想的窗口，也适合高等院校机械和其他工程专业师生，以及从事机器人科学与系统研究、设计、制造和应用的工程技术人员学习和参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

双足步行机器人制作指南 / (日) ROBO-ONE 委员会编；李端玲等译。  
—北京：科学出版社，2012

ISBN 978-7-03-035693-2

I. 双… II. ①R…②李… III. 机器人-制作 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 234999 号

责任编辑：喻永光 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：15 1/2  
印数：1—5 000 字数：291 000

定价：38.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)





# 目录

<b>第 1 章 走近ROBO-ONE</b> .....	<b>1</b>
1.1 ROBO-ONE的魅力 .....	2
1.2 ROBO-ONE的诞生 .....	3
1.3 ROBO-ONE之梦 .....	4
1.3.1 梦想·感动·爱 .....	4
1.3.2 铁臂阿童木能否实现 .....	4
1.4 ROBO-ONE规则的变化 .....	5
<b>第 2 章 制作双足步行机器人</b> .....	<b>11</b>
2.1 认识ROBO-ONE FREEDOM .....	12
2.1.1 FREEDOM简介 .....	12
2.1.2 FREEDOM 的规格参数 .....	13
2.1.3 全身图 .....	14
2.1.4 腿的构造 .....	14
2.1.5 躯干 .....	16
2.1.6 手臂的构造 .....	16
2.1.7 头的构造 .....	17
2.1.8 CPU和主板 .....	17
2.1.9 降低成本的关键 .....	17
2.1.10 参加ROBO-ONE所需的机器人技术 .....	18
2.1.11 机器人制作流程 .....	18
2.2 开发环境 .....	20
2.2.1 CPU的选型 .....	20
2.2.2 编译器的选型 .....	20
2.2.3 PC的选型 .....	20
2.2.4 无线系统 .....	22
2.2.5 SH7045F主板BTC050 .....	22

2.2.6	GCC .....	27
2.2.7	GCC Developer Lite的使用方法 .....	27
2.2.8	GCC Developer Lite的功能 .....	28
2.2.9	以SH7045F主板为对象的开发顺序 .....	29
2.2.10	GCC Developer Lite中GCC函数的使用 .....	34
2.3	SH2的RC伺服电机控制 .....	35
2.3.1	RC伺服电机的控制 .....	35
2.3.2	通过SH2对RC伺服电机进行控制 .....	35
2.3.3	TIOR（定时器I/O控制寄存器） .....	40
2.3.4	输出16通道的PWM .....	43
2.3.5	I/O基板 .....	44
2.4	伺服电机的概要和现状 .....	54
2.4.1	伺服电机的研究 .....	55
2.4.2	双叶电子工业株式会社の伺服电机 .....	55
2.4.3	近藤科学株式会社の伺服电机 .....	56
2.4.4	近藤科学株式会社伺服电机构造 .....	57
2.4.5	HITEC的伺服电机 .....	59
2.4.6	双足步行机器人用伺服电机 .....	59
2.4.7	伺服电机的特性检测 .....	61
2.5	基于仿真的分析 .....	63
2.5.1	绘制3D图 .....	63
2.5.2	MATLAB Simulink .....	65
2.5.3	MSC.visualNastran4D .....	66
2.5.4	重心移动仿真 .....	66
2.5.5	屈伸的仿真 .....	67
2.5.6	步行的仿真 .....	68
2.5.7	通过MSC.visualNastran4D进行仿真 .....	68
2.5.8	ROBO-ONE on PC .....	69
2.6	腿部的制作 .....	69
2.7	步行模式的生成 .....	71
2.7.1	步行模式的生成方法 .....	71
2.7.2	无需计算就让机器人动起来的方法 .....	71
2.7.3	示例程序 .....	72
2.7.4	简单步行模式的生成 .....	81
2.7.5	原地踏步 .....	83

2.7.6	单脚抬起的程序 .....	85
2.7.7	原地踏步的程序 .....	86
2.8	脚底传感器的使用方法 .....	97
2.8.1	脚底传感器原理 .....	97
2.8.2	力传感器 .....	98
2.8.3	用SH7045读取模拟量 .....	99

## 第 3 章 R-Blue 的制作案例 ..... 103

3.1	引 言 .....	104
3.2	瞄准终极的ROBO-ONE .....	104
3.3	机器人整体构型 .....	105
3.3.1	伺服电机 .....	105
3.4	机器人的关节结构 .....	106
3.4.1	虚轴的作用 .....	106
3.4.2	虚轴的制作 .....	106
3.4.3	进一步探讨轴承 .....	107
3.5	骨 架 .....	108
3.5.1	按单元来考虑 .....	108
3.5.2	伺服电机的连接 .....	109
3.5.3	自由度 .....	109
3.5.4	连接方法 .....	109
3.5.5	单端固定轴和偏转轴的加强 .....	109
3.5.6	骨架的厚度 .....	111
3.5.7	材 料 .....	111
3.5.8	螺钉的种类 .....	112
3.5.9	螺钉的轻量化 .....	112
3.6	躯体的检测 .....	112
3.6.1	控制板 .....	113
3.6.2	电 池 .....	113
3.7	YDH-PDS .....	114
3.7.1	大小、质量 .....	114
3.7.2	大腿间距离 .....	115
3.7.3	伺服电机固定方法 .....	115
3.8	R-Blue V .....	116

3.8.1	制作理念 .....	116
3.8.2	Autodesk Inventor .....	117
3.8.3	iMCs05 .....	117
3.9	结 语 .....	118
<b>第 4 章</b>	<b>钢铁战士的制作案例 .....</b>	<b>121</b>
4.1	引 言 .....	122
4.2	钢铁战士系列 .....	122
4.3	钢铁战士1号.....	122
4.3.1	理 念 .....	123
4.3.2	设计方针 .....	123
4.3.3	比赛结果 .....	124
4.3.4	强度不足 .....	124
4.3.5	感 动 .....	124
4.4	钢铁战士2号.....	125
4.4.1	理 念 .....	125
4.4.2	起 身 .....	125
4.4.3	自由度 .....	126
4.4.4	骨 架 .....	127
4.4.5	铝制舵盘 .....	127
4.4.6	控制单元 .....	127
4.4.7	达成目标、取胜 .....	128
4.5	钢铁战士3号.....	128
4.5.1	理 念 .....	128
4.5.2	自由度 .....	129
4.5.3	起 身 .....	129
4.5.4	秘密武器 .....	129
4.5.5	预选第二名 .....	130
4.5.6	败因分析 .....	130
4.5.7	开发绝招 .....	131
4.5.8	翻跟头 .....	131
4.5.9	亚洲大赛 .....	131
4.6	钢铁战士4号.....	132
4.6.1	理 念 .....	132

4.6.2	脚踝的旋转轴 .....	132
4.6.3	可张合的手 .....	134
4.6.4	胸部的旋转轴 .....	135
4.6.5	控制板 .....	137
4.6.6	姿势控制 .....	138
4.6.7	配 线 .....	138
4.6.8	结果不尽如人意 .....	139
4.7	结 语 .....	140
<b>第 5 章</b>	<b>A-DO的制作案例 .....</b>	<b>141</b>
5.1	引 言 .....	142
5.2	历代A-DO .....	142
5.2.1	A-DO的诞生 .....	142
5.2.2	A-DO 1号 .....	143
5.2.3	A-DO 2号 .....	143
5.2.4	A-DO 3号 .....	144
5.3	A-DO 4号 .....	146
5.3.1	加入主题思想的制作 .....	146
5.3.2	A-DO 4号的规格 .....	147
5.3.3	A-DO成功瘦身 .....	147
5.3.4	伺服电机 .....	148
5.3.5	I.C.S .....	149
5.3.6	怎样防止伺服电机抖动 .....	150
5.3.7	KRS-2346ICS .....	151
5.3.8	ROBO-UNICON .....	151
5.3.9	锂电池 .....	156
5.3.10	机器人的结构 .....	157
5.3.11	Inventor7 .....	158
5.3.12	A-DO的关节结构 .....	159
5.3.13	A-DO的载荷测量 .....	159
5.4	结 语 .....	160
<b>第 6 章</b>	<b>OmniHead的制作案例 .....</b>	<b>163</b>
6.1	引 言 .....	164



6.2 概 述 .....	164
6.2.1 “万无一失”的制作方针 .....	164
6.2.2 浓缩的精彩 .....	164
6.2.3 目标锁定钢铁战士 .....	165
6.3 机体结构设计 .....	165
6.3.1 伺服电机 .....	165
6.3.2 模拟伺服电机和数字伺服电机 .....	166
6.3.3 铝板的切削和折弯 .....	166
6.3.4 尽量双边支撑 .....	167
6.3.5 关节的基本构造 .....	168
6.3.6 避免正交轴设计 .....	168
6.3.7 腿部的自由度配置 .....	169
6.3.8 手臂的自由度配置 .....	170
6.3.9 躯干的设计 .....	171
6.3.10 CAD .....	172
6.4 电气系统 .....	173
6.4.1 PIC? H8? SH2? .....	173
6.4.2 PWM是软件还是硬件? .....	174
6.4.3 无线控制? 串口? .....	175
6.4.4 传感器和自律性 .....	176
6.4.5 电 池 .....	176
6.4.6 配 线 .....	176
6.5 固 件 ( Firm Ware ) .....	177
6.5.1 机器人动作 .....	177
6.5.2 什么是动作? .....	178
6.5.3 固件构成 .....	178
6.5.4 接收器信号的读出 .....	179
6.5.5 加速度传感器的读出 .....	179
6.5.6 控制模块 .....	179
6.5.7 自动演示管理模块 .....	179
6.5.8 动作管理模块 .....	180
6.5.9 姿势插补模块 .....	180
6.5.10 脉冲发生模块 .....	181
6.6 动作编辑 .....	181

6.6.1	系统构成 .....	181
6.6.2	动作编辑器——Top Dancer .....	182
6.6.3	关节滑动条 .....	182
6.6.4	姿势的序列=动作 .....	183
6.6.5	控制杆操作任务分配 .....	184
6.6.6	关于主从模式 .....	184
6.6.7	自动演示编辑 .....	185
6.6.8	其他功能 .....	186
6.7	动作生成实例 .....	186
6.7.1	步行 .....	186
6.7.2	起身 .....	187
6.7.3	空转 .....	188
6.8	结 语 .....	188
<b>第 7 章</b>	<b>刚王丸的制作案例 .....</b>	<b>189</b>
7.1	引 言 .....	190
7.2	刚王丸的开始 .....	190
7.2.1	也许可行 .....	190
7.2.2	刚王丸的理念 .....	190
7.3	刚王丸的规格 .....	191
7.3.1	硬件构成 .....	191
7.3.2	伺服电机 .....	192
7.3.3	CPU控制系统 .....	193
7.3.4	控制系统子CPU .....	194
7.4	整机设计 .....	195
7.4.1	控制器的设计 .....	195
7.4.2	操控方手臂的设计 .....	197
7.4.3	机器人手臂的设计 .....	198
7.4.4	机器人的腿部设计 .....	200
7.4.5	机器人的躯干设计 .....	202
7.5	实际应用 .....	203
7.5.1	多轴控制算法 .....	203
7.5.2	步态算法 .....	207
7.5.3	主从控制算法 .....	210

7.6 结 语 .....	213
<b>第 8 章 开拓者4号的制作案例 .....</b>	<b>215</b>
8.1 引 言 .....	216
8.1.1 开拓者4号的规格 .....	216
8.1.2 开拓者4号的成绩 .....	216
8.2 开发背景 .....	217
8.2.1 开发开拓者4号的原委 .....	217
8.2.2 开拓者4号的开发目的及理念 .....	217
8.3 设 计 .....	218
8.3.1 开拓者4号的外形 .....	218
8.3.2 开拓者4号的设计要点 .....	219
8.4 硬 件 .....	222
8.4.1 支 架 .....	222
8.4.2 伺服器 .....	222
8.4.3 控制板 .....	223
8.4.4 电 池 .....	223
8.4.5 无线系统 .....	223
8.4.6 传感器 .....	224
8.4.7 其他部件 .....	224
8.5 软 件 .....	225
8.5.1 软件开发环境 .....	225
8.5.2 软件构成 .....	225
8.5.3 步态算法 .....	225
8.5.4 基于陀螺仪的控制 .....	229
8.5.5 基于加速度传感器的控制 .....	229
8.5.6 动 作 .....	230
8.6 结 语 .....	231

# 第1章

## 走近ROBO-ONE

西村 辉一 ROBO-ONE委员会代表。

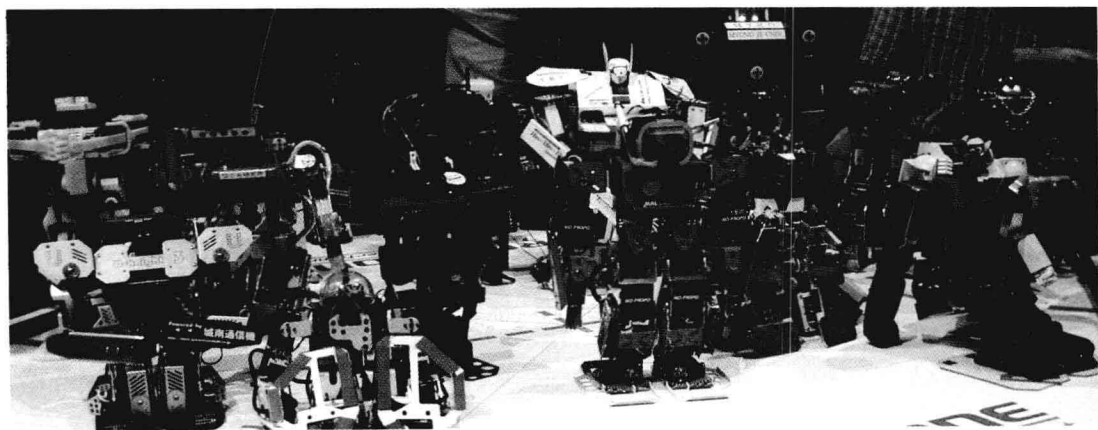


## 1.1 ROBO-ONE的魅力

双足步行机器人竞技大赛每半年举行1届，至今已经举办2年了。第1届比赛中机器人勉强可以走路，第2届比赛中就可以做起身动作了。到第3届比赛时起身动作已不再稀奇，3点倒立的机器人也出现了。到了第4届比赛，出现了多台2点倒立机器人。最终，1点倒立机器人也登场了。（图片1.1~图片1.7，详细信息请关注<http://www.roboto-one.com>。）

是什么如此激励着工程师们呢？是梦想和感动。技术的进步正是工程师们想要实现的梦想，实现梦想时众人给予的掌声与喝彩又使他们感动。这与研究者开发出优秀产品得到顾客欣赏时的喜悦和感动是相同的。

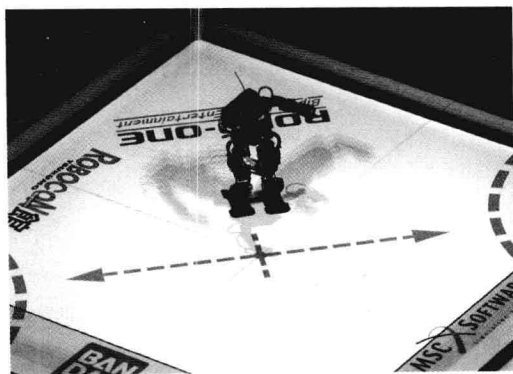
日本的年轻工程师们一直都在渴望自由畅想和追求梦想的喜悦。总之，培养肩负日本未来的年轻工程师的ROBO-ONE正不断地进步，这是事实。因此，日本传统的开发体制和体制变革或许就能够以技术立国为目标了。



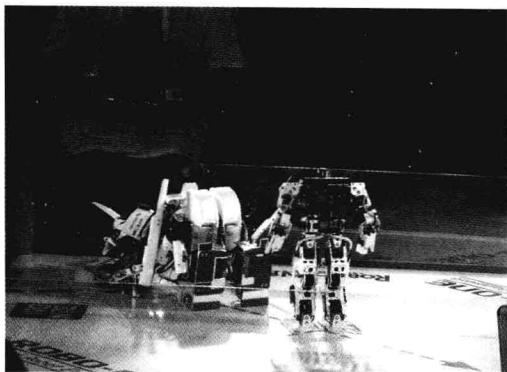
图片1.1 通过第4届ROBO-ONE大赛预选的机器人



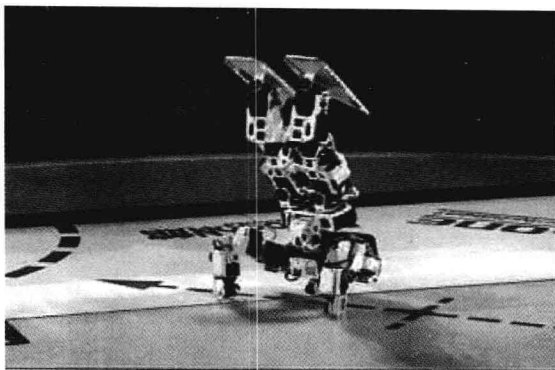
图片1.2 第1届ROBO-ONE大赛现场



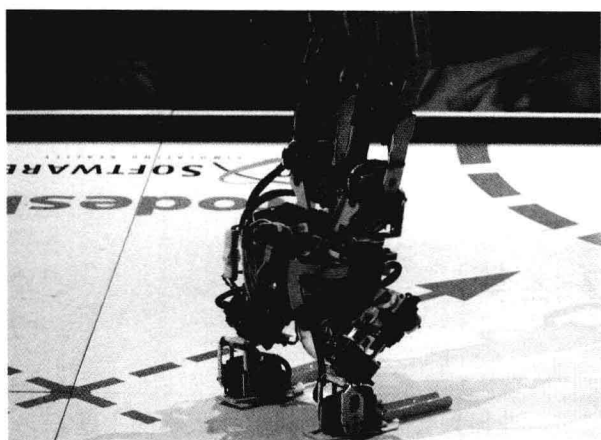
图片1.3 第2届ROBO-ONE大赛现场



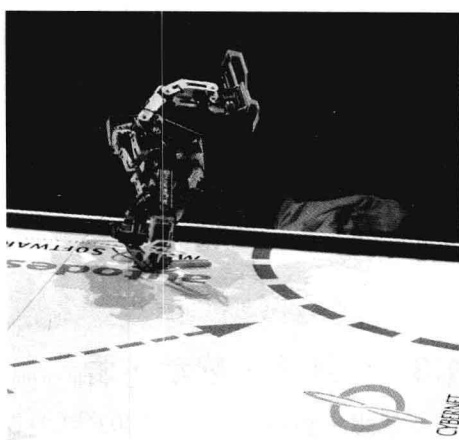
图片1.4 第3届ROBO-ONE大赛现场



图片1.5 3点倒立机器人（第3届）



图片1.6 倒立（第4届）



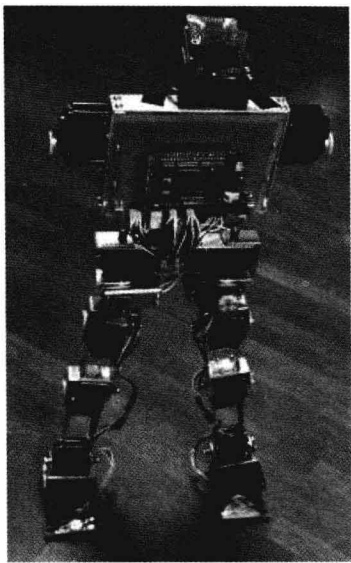
图片1.7 单手倒立机器人



## 1.2 ROBO-ONE的诞生

两年前的某一天，在西村机器人俱乐部（<http://www.5b.biglobe.ne.jp/~nrc/>）的年会上有人提出“双足步行机器人的格斗技术能实现吗？”“这么异想天开的事怎么可能实现！”“没有人会参加吧？”诸如此类的问题占了大多数。但是这一提议也激发了大家尝试一下的念头。想要尝试就得亲自去做。半年后，NR-1机器人实现了走路的功能。当时我想连不懂机器人技术的我都可以做到，日本工程师也能够做到。于是就与当时ROBOCON杂志的主编共同商量开始第1届ROBO-ONE的筹备工作，第1届比赛的正式举办是1年后的2002年2月。

如果当时没有开那个玩笑，就不会有今天的ROBO-ONE了。铁臂阿童木给我们带来了梦想，我们要向着梦想前进。永远难忘NR-1迈出第一步时的喜悦和感动（图片1.8和图片1.9）。我想让更多的参与者体会到这种感动，这样就会有新技术诞生。



图片1.8 NR-1



图片1.9 NR-2



## 1.3 ROBO-ONE之梦

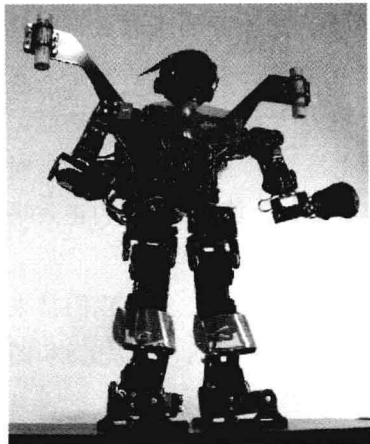
### 1.3.1 梦想·感动·爱

梦想·感动·爱，是2003年8月在川崎市产业振兴会馆举办的机器人大赛的主题。

近些年关于双足步行机器人的研究非常盛行，本田的ASIMO机器人就很不错。双足步行机器人是怀揣着铁臂阿童木这一梦想成长起来的人们和看着《无敌三四郎》成长起来的人们共同的梦想。追逐这一梦想的人很多。它不仅仅是技术人员的梦想，也是日本人的梦想。

想象一下，将来铁臂阿童木生活在自己的身边是什么情景。不过，与出处不明的机器人生活在一起是非常危险的。因为我们不知道“邪恶博士”会让机器人做什么。ROBO-ONE会告诉我们人类与机器人共存的情况下会存在什么问题，如何解决这些问题。因此，机器人活动的环境就是人类生存的环境。

如果机器人不是为人类发挥作用，那就没有存在的价值。因此，制作机器人的人一定要有爱心。



图片1.10 离地前的NR-2

### 1.3.2 铁臂阿童木能否实现

如果有机会召集大学教师针对“铁臂阿童木能否实现”进行讨论，我想说“不管怎样先尝试一下吧”。首先尝试一下在空中飞翔，就像图片1.10中的NR-2。详细情况

可以关注一下西村机器人俱乐部网站上飞翔机器人的视频。

不过也没必要一上来就让机器人做这些。仿真实验已经取得显著进步，精确度也提高了。使用仿真实验软件，无需牺牲机器人就可以得出结果。

ROBO-ONE委员会希望能在2010年实施宇宙大会计划。为了实现这一梦想，委员会开始了ROBO-ONE on PC计划。我们通过在PC上模拟宇宙空间来推动开发的顺利进行，努力的过程中，我们坚信：铁臂阿童木的梦想要由我们来实现！



## 1.4 ROBO-ONE规则的变化

ROBO-ONE的规则随着机器人的发展不断发生变化。最初，能够走路就行，然后加上了屈伸动作，又追加了横向走动，甚至渐渐地对走路速度也有所要求。

在第5届大赛中预选的规定演技中又加入了以书本为道具踏上和走下的技能，估计起身、跑动、跳跃等动作今后也会被加入其中。

以下是第5届ROBO-ONE简介和竞技规则。Q&A被登载在ROBO-ONE主页（<http://www.rob-one.com>）上，大家可以参考主页内容。此外，在BBS等上面有相关的问题讨论，也可以查看一下。

### 第5届ROBO-ONE简介及竞技规则

2003年9月30日 ROBO-ONE委员会

#### 简介

##### 1. 参赛流程

- (1) 书面审查。
- (2) 参赛资格审查。
- (3) 预选展示。
- (4) 决胜淘汰赛。

##### 2. 书面审查

根据报名材料进行审查。如果安全性存在问题，审查员会提出改善要求，无法改善的话将拒绝参赛。此外，如果有2台以上创意相同的机器人在同一组参赛的情况，或者用市面上销售的机器人参赛的情况，请在材料中写明各自的机器人的独特性。被认定与其他机器人相同者，将不允许参赛。（参考ROBO-ONE竞技规则第1章。）

##### 3. 参赛资格审查

审查是否满足参赛资格。



还没有通过参赛资格审查的参赛者，在预选前进行既定动作的公开展示。在此期间，拥有参赛资格的选手可以到会场进行无线系统的检查。

#### 4. 预选展示

预选时进行2min的公开展示，由审查员评分。

公开展示环节设定了规定演技。本次是在书本上做踏上和走下动作，选定ROBOCON杂志为道具用书。

预选展示中主要针对机器人的行走打分。

比赛更加看重双足步行机器人返回原点和行走方面的能力。我们期待机器人走得更快、脚步抬得更高。不过，淘汰赛中可以自由地进行水平方向的缓慢行走。

#### 5. 决胜淘汰赛

决胜淘汰赛是在预选展示中前32名的机器人之间进行的。第1、2场比赛只进行竞技比赛。比赛由审查员打分，获得高分的机器人胜出。

第3场比赛进行公开展示和竞技比赛。公开展示环节，2台机器人同时进行展示，然后进行竞技比赛。公开展示和竞技比赛由审查员打分，获得高分的机器人胜出。

#### 第5届ROBO-ONE参赛资格及竞技规则的变更

由于参赛机器人技术水平的提高，参赛资格及竞技规则进行如下变更。

依据既定运动进行参赛资格审查。以下（2）～（4）项禁止使用无线和有线，所有动作都按顺序进行。本次竞技场大小是第3届大赛中的1/4。

- （1）满足ROBO-ONE竞技规则。
- （2）双足步行机器人能够在10s内行走5步以上，行走时单脚必须离地。
- （3）能够屈伸。
- （4）能够横向行走，行走时单脚必须离地。

此外，资格审查最多可进行5次。

### ROBO-ONE竞技规则

ROBO-ONE的目的是让更多的人体会到“机器人的乐趣”。因为ROBO-ONE的目标是让观众享受机器人和比赛的乐趣并且激发参赛者的热情，因此人们更加重视技术的优劣和娱乐性，而不是比赛的胜负。

#### 第1章 竞技

竞技就是在限定的竞技场上，参赛者用自己制作的机器人进行公开展示和比赛，根据裁判的评定决定胜负。