

国防科技大学学术著作专项经费资助出版

ROS 与中型组足球机器人

■ 卢惠民 肖军浩 郑志强 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

ROS 与中型组足球机器人

卢惠民 肖军浩 郑志强 曾志文 著
熊丹 于清华 黄开宏

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

机器人世界杯(Robot World Cup, RoboCup)是当前国际上级别最高、规模最大、影响最广泛的机器人赛事,其目的是通过提供具有标志性和挑战性的公共测试平台促进人工智能和智能机器人等相关研究的发展。机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)自2010年问世以来在机器人研究领域得到了迅速推广并衍生了广泛的应用,有望成为机器人软件的事实标准。本书将上述二项智能机器人领域的主流研究有机结合起来,以国防科学技术大学近十年来中型组足球机器人系统的研究成果为基础,介绍了机器人的全向运动平台、电气系统、视觉感知、运动规划与控制、多机器人协同控制、机器人系统仿真的设计与实现,尤其是如何将ROS应用于以足球机器人为例的多机器人系统软件的设计与实现。

本书中介绍的方法和算法均在实践中尤其是中型组足球机器人实际比赛中得到了充分应用和检验,较好地解决了足球机器人系统设计与应用中的很多科学问题和实际工程问题,可供从事智能机器人、机器人操作系统、机器人视觉、机器人控制、多机器人协同等方向研究的同行特别是新参与RoboCup研究的团队参考借鉴,也可作为相关学科专业研究生、高年级本科生的教材或者参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ROS与中型组足球机器人/卢惠民,肖军浩,郑志强等著.
—北京:国防工业出版社,2016.10
ISBN 978-7-118-10952-8

I. ①R… II. ①卢… ②肖… ③郑… III. ①足球运动—智能机器人—研究 IV. ①TP242.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第228794号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 317千字
2016年10月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 65.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

机器人世界杯(Robot World Cup, RoboCup)为人工智能和智能机器人研究提供了一个具有标志性和挑战性的公共测试平台,其最终目标是:到2050年,一支由完全自主的类人机器人组成的足球队能够打败当时的人类足球世界冠军。国防科学技术大学机器人足球研究组自1999年以来一直从事机器人足球系统相关理论与技术研究,在智能机器人设计、机器人视觉、机器人运动控制、多机器人协同控制等方面做了大量的研究工作,先后独立完成了RoboCup仿真组、小型组、中型组、救援组机器人系统等的研制工作,突破了大量关键技术,取得了一系列研究成果,在IEEE Transactions on Robotics、Pattern Recognition、International Journal of Robust and Nonlinear Control、Mechatronics、Advanced Robotics、Industrial Robot: An International Journal、《自动化学报》、《机器人》、IEEE ICRA、IEEE/RSJ IROS、IFAC WC、RoboCup Symposium等国内外期刊和会议上发表论文近百篇,获得国家发明专利1项、实用新型专利3项、软件著作权4项。研究组自主研发了多系列的具有完全自主知识产权的全向运动/全向视觉多自主移动机器人系统和救援机器人系统,2006年以来8次参加RoboCup机器人足球世界杯比赛,进入中型组8强4次,6强3次,获得技术挑战赛亚军1次、季军3次;2004年起参加中国机器人大赛暨RoboCup中国公开赛,获得中型组冠军3次,亚军1次,季军2次,获得技术挑战赛冠军7次,并连续6年获得救援机器人组冠军。研究组成员4次担任RoboCup中型组技术委员会成员,2次担任组织委员会成员。

机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)提供类似操作系统的功能,包含硬件抽象描述、底层驱动管理、共用功能执行、程序间消息传递等,为开发机器人软件提供了一个灵活的框架,为在各种机器人平台上实现复杂、鲁棒的行为集成了众多工具包、函数库以及协议。ROS在机器人研究领域得到了迅速推广并衍生了广泛的应用,越来越多的研究人员选择ROS构建其机器人软件系统,开发了许多诸如定位建图、运动规划、感知认知、仿真验证等上层功能软件包。使用ROS的机器人包括大量的工业机器人、服务机器人、教学机器人、无人机、航天机器人等等,ROS有望进一步成为机器人软件开发的事实标准。国防科学技术大学机器人足球研究组是国内最早使用ROS的研究组之一,自2013年开始研究使用ROS为RoboCup中型组足球机器人、救援机器人等各种移动机器人构建软件系统,以提高

代码的重要性和可扩展性,避免了大量低水平重复性工作,极大地提高了机器人软件开发的效率。研究组也将所开发的基于 ROS 的中型组足球机器人软件系统和基于 ROS 和 Gazebo 的仿真系统开源,得到了国际同行的高度认可。

本书内容紧扣 ROS 与中型组足球机器人系统,涵盖了 RoboCup 中型组足球机器人研究中的几乎所有关键技术,如全向运动平台设计、电气系统设计、视觉感知、运动规划与控制、多机器人协同控制、机器人系统仿真等,尤其介绍了如何将 ROS 应用于足球机器人软件系统的设计与各功能模块的实现,是研究团队成员近十年来在该问题上的原创研究成果的精华浓缩。本书理论研究和工程应用结合紧密,介绍的主要成果均在实践中尤其在实际机器人比赛中得到了充分应用和检验,较好地解决了机器人足球系统设计与应用中的很多科学问题和实际工程问题,为研究组参加 RoboCup 国际国内比赛及学术交流取得优异成绩奠定了基础。希望本书能为从事智能机器人、机器人操作系统、机器人视觉、机器人控制、多机器人协同等方向研究的同行,特别是愿意开展机器人足球研究的团队,提供一些有益的参考和借鉴。

本书是研究组包括作者及张辉教授,已毕业的博士柳林、刘斐、季秀才、舒文杰、耿丽娜、海丹、王祥科、杨绍武、唐帅,在读博士生曾志文、熊丹、黄开宏、于清华,已毕业的硕士夏旻、刘伟、刘玉鹏、崔连虎、孙方义、卢盛才、董鹏、董夏斌、邬林波、梁杰、程帅、郑小祥、崔清柱、杨祥林,在读硕士生代维、任君凯、黄玉玺、程球、姚伟嘉等人在内的所有成员集体智慧的结晶。

研究组在开展机器人足球系统研究的过程中,得到了国家自然科学基金(编号:61403409、61503401、69975023)、国家“863”计划(编号:2001AA422270)和中国博士后科学基金(编号:2014M562648)的资助,和国防科技大学、机电工程与自动化学院和自动控制系各级领导、机关的大力支持,尤其要感谢学校训练部外事处在出国竞赛与学术交流上提供的资助,学校研究生院培养处在研究生科技创新计划“RoboCup 机器人足球世界杯”、十二五重点建设“机器人足球比赛 MOORE 教学环境”和学院、系在军队重点实验室“机器人足球系统研究及学术交流”等项目上的大力资助,感谢吴美平教授、杨俊教授、谢成钢高工、刘锋副研究员、徐晓红副教授、朱群参谋、李丽刚参谋、董霖参谋、辛华参谋、张立杰参谋、吕云霄参谋等人提供的大力帮助。感谢国防科技大学学术著作专项经费对本书出版的大力支持。

我们热切地希望得到各位读者对本书提出的宝贵意见。

我们的 E-mail 地址是: {1hmnew, zqzheng} @ nudt. edu. cn, junhao. xiao @ ieeec. org。

卢惠民,肖军浩,郑志强
2016年4月于长沙

目 录

第一部分 概 述

第 1 章 RoboCup 中型组介绍	3
1.1 RoboCup 机器人足球世界杯	3
1.2 RoboCup 中型组比赛与中型组机器人	4
1.3 RoboCup 中型组的发展现状与趋势	8
1.4 国防科技大学中型组机器人足球队	10
第 2 章 足球机器人软硬件框架	12
2.1 机械结构	12
2.2 电气系统	14
2.3 基于 ROS 的软件框架	18

第二部分 平台与底层控制

第 3 章 全向运动平台	25
3.1 全向轮设计	25
3.2 全向运动平台设计	28
3.3 全向运动平台数学模型建立	33
3.4 基于运动学模型的底层运动控制	44
3.5 基于动力学模型的底层运动控制	61
3.6 小结	70
第 4 章 主动控球系统	71
4.1 主动控球系统机构设计与建模	71
4.2 主动控球系统控制算法设计	75
4.3 ROS 下控制系统实现	76
4.4 实验结果与分析	78
4.5 小结	81
第 5 章 击球系统	82
5.1 基于电磁铁的击球系统	82

5.2	击球机构机械设计	84
5.3	击球控制电路	84
5.4	ROS 节点实现	85
5.5	小结	86

第三部分 环境感知

第 6 章	全向视觉系统	89
6.1	全向视觉系统的设计及标定	89
6.2	ROS 下摄像机驱动以及 OpenCV 视觉库使用	96
6.3	足球机器人全向视觉感知算法	104
第 7 章	前向视觉	113
7.1	前向摄像机安装及驱动	113
7.2	前向视觉的标定及坐标变换	114
7.3	ROS 节点及消息通信	118
第 8 章	Kinect 视觉	119
8.1	Kinect 简介	119
8.2	Kinect 驱动	121
8.3	点云库 PCL	123
8.4	基于 Kinect 的足球识别	125
8.5	Kinect 视觉系统标定	126
8.6	足球三维轨迹拟合与预测	128
8.7	多 Kinect 的使用	130

第四部分 规划与控制

第 9 章	基于 subtargets 的路径规划	135
9.1	应用子目标点法生成中间点	136
9.2	生成中间点算法	137
9.3	基于三次样条曲线法的路径生成	138
9.4	几何路径生成	139
9.5	几何路径轨迹化	140
9.6	动态环境下算法可行性分析	142
9.7	实验结果	142
9.8	小结	146

第 10 章	基于模型预测控制的全向移动机器人轨迹跟踪	147
10.1	概述	147
10.2	模型建立以及问题描述	149
10.3	基于拉盖尔函数的模型预测控制器设计	151
10.4	实验结果与分析	155
10.5	小结	162
第 11 章	基于增强学习的足球机器人行为控制	163
11.1	增强学习的模型和基本算法	163
11.2	基于 CMAC 的 Sarsa 直接梯度增强学习算法	167
11.3	Sarsa(λ) 增强学习在机器人行为控制中的应用	170
11.4	基于三角剖分的 CMAC 在机器人行为控制中的应用	173
11.5	启发式信息在机器人行为控制中的应用	179
11.6	小结	181

第五部分 多机器人协同

第 12 章	多机器人通信	185
12.1	DA - TDMA 通信协议	186
12.2	RTDB 的实现和使用	188
第 13 章	多机器人角色分配	191
13.1	多机器人任务分配概述	191
13.2	主要的多机器人任务分配模式	195
13.3	RoboCup 中的任务分配问题分析	197
13.4	NuBot 机器人足球队任务分配	200
13.5	实验及比赛分析	205
13.6	小结	208
第 14 章	多机器人编队控制	209
14.1	多机器人编队控制概述	209
14.2	多机器人编队的数学描述	210
14.3	编队控制	211
14.4	编队控制实验	215
14.5	小结	218
第 15 章	基于 ROS 和 Gazebo 的足球机器人仿真系统	219
15.1	仿真软件 Gazebo	219

15.2	Gazebo 与 ROS 的交互	220
15.3	仿真模型的搭建	221
15.4	仿真世界的创建	224
15.5	单个足球机器人的运动仿真实现	226
15.6	多足球机器人协同的仿真实现	235
15.7	小结	240
附录	IEL6751 基于 SOEM 库的配置	241
	参考文献	252

第一部分

概 述

第一部分共包括 2 章:第 1 章首先介绍 RoboCup 机器人足球世界杯、中型组比赛与中型组足球机器人、中型组的发展现状和发展趋势等研究背景,然后简要回顾国防科学技术大学机器人足球研究小组十多年来在中型组足球机器人(NuBot)上的研究历程。第 2 章主要介绍根据高度动态对抗比赛环境对机器人足球系统的要求,所设计的 NuBot 足球机器人的软硬件框架,包括机械结构、电气系统和软件框架,这些软硬件框架也是本书涉及的机器人足球系统相关关键技术研究的基础。

第 1 章 RoboCup 中型组介绍

1.1 RoboCup 机器人足球世界杯

机器人足球世界杯(Robot Soccer World Cup, RoboCup)^[1]是国际上—项为促进分布式人工智能、智能机器人技术及其相关领域的研究与发展而举行的大型比赛、教育和学术活动,其目的是通过机器人足球比赛,为人工智能和智能机器人研究成果交流提供一个具有标志性和挑战性的公共测试平台,促进相关领域研究的发展。RoboCup 的最终目标是到 2050 年,一支由完全自主的类人机器人组成的足球队能够打败当时的人类足球世界冠军。

机器人足球是由加拿大大不列颠哥伦比亚大学教授 Alan Mackworth 在 1992 年的一次国际人工智能会议上首次提出的^[2],此想法一经提出,便得到了各国科学家的普遍赞同和积极响应,国际上许多著名的研究机构和组织开始开展研究,将其付诸实现并不断推动其发展。RoboCup 始于 1997 年,是目前世界范围内水平最高的机器人足球竞赛,每届比赛期间还举行机器人学术国际研讨会(RoboCup International Symposium),同时还举办一系列的自动化设备、技术特别是机器人相关产品的展览会。RoboCup 世界杯比赛吸引了来自世界各地众多研究机构的积极参与,以在荷兰埃因霍温举行的 RoboCup2013^[3]为例,来自 45 个国家和地区的 2661 名研究人员参加了该项赛事,超过四万名观众现场观看了比赛。

RoboCup 比赛共分为机器人足球、机器人救援、家庭机器人、青少年机器人竞赛等一系列组别的赛事,其中机器人足球竞赛致力于促进人工智能和机器人技术的进步,机器人救援和家庭机器人竞赛主要面向于机器人的应用,青少年机器人竞赛则是为了吸引青少年对机器人的兴趣,培养未来的机器人研究人才。RoboCup 各项赛事如下:

机器人足球(RoboCup Soccer):2D 仿真组,3D 仿真组,小型组,中型组,标准平台组,类人组;

机器人救援(RoboCup Rescue):救援机器人组,救援仿真组;

家庭机器人(RoboCup@home);

青少年机器人比赛(RoboCup Junior)。

各个组别的比赛现场如图 1.1 所示。除了 RoboCup 世界杯比赛外,一些参与 RoboCup 赛事较为活跃的地区还组织一系列的 RoboCup 地区公开赛,较有代表性的有 RoboCup German Open、RoboCup US Open、RoboCup China Open、RoboCup Japan Open、RoboCup Iran Open、RoboCup Portuguese Open、Robotics Festival 等。

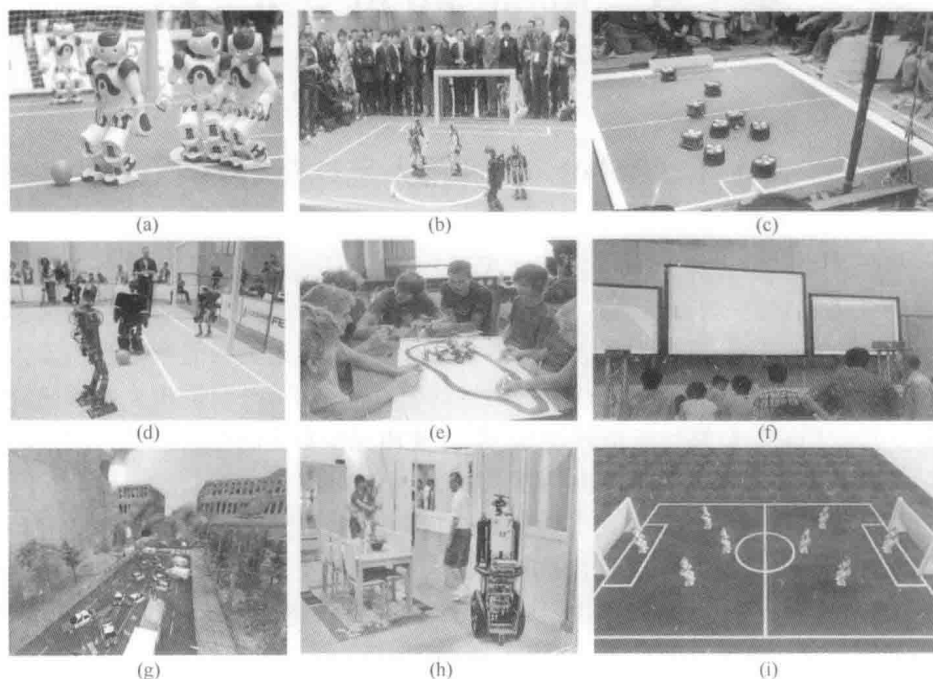


图 1.1 RoboCup 的各个赛别

- (a) 标准平台组;(b) 机器人足球小型类人组;(c) 机器人足球小型组;
- (d) 机器人足球中型类人组;(e) 青少年组;(f) 机器人足球 2D 仿真组;
- (g) 救援机器人仿真组;(h) 家庭组;(i) 机器人足球 3D 仿真组。

1.2 RoboCup 中型组比赛与中型组机器人

1.2.1 RoboCup 中型组比赛介绍

RoboCup 中型组比赛(RoboCup Middle Size League, RoboCup MSL)是 RoboCup 比赛的主要项目之一,自 1997 年第一届 RoboCup 比赛开始即是正式比赛项目。RoboCup 中型组当前的比赛规则^[4]允许每支球队最多 5 个尺寸不超过 50cm × 50cm × 80cm、重量不超过 40kg 的机器人在 18m × 12m 的绿色场地上使用黄色标准 5 号足球进行比赛。所有的传感器和计算设备都由机器人自身携带,机器人能使用带宽受限的无线网络与队友、场外 Coach 机进行通信,每个参赛队使用的通信

带宽不能超过 IEEE 802.11b 标准带宽的 20%，即 2.2Mb/s。除了机器人上下场外，不允许人类对比赛进行任何额外的干预。因此机器人是全分布式的和全自主的，必须能够通过自身携带的传感器和与队友的无线通信获得环境感知信息，完成目标识别和自定位等，并使用自身携带的计算机自主完成机器人的决策控制，实现与队友的协调与协作等，以完成比赛任务。每场比赛分成两个 15min 的半场。比赛过程由人类裁判控制，裁判拥有绝对的权威贯彻比赛规则的执行。同时有一个助理裁判负责操作裁判盒程序，根据主裁判的判罚发出相应的指令，如比赛开始、暂停、开球、任意球、争球、球门球等给比赛双方球队的场外 Coach 机，场外 Coach 机再将指令通过无线网络发送给场上比赛的机器人。中型组比赛过程示意图如图 1.2 所示，典型比赛场景如图 1.3 所示。

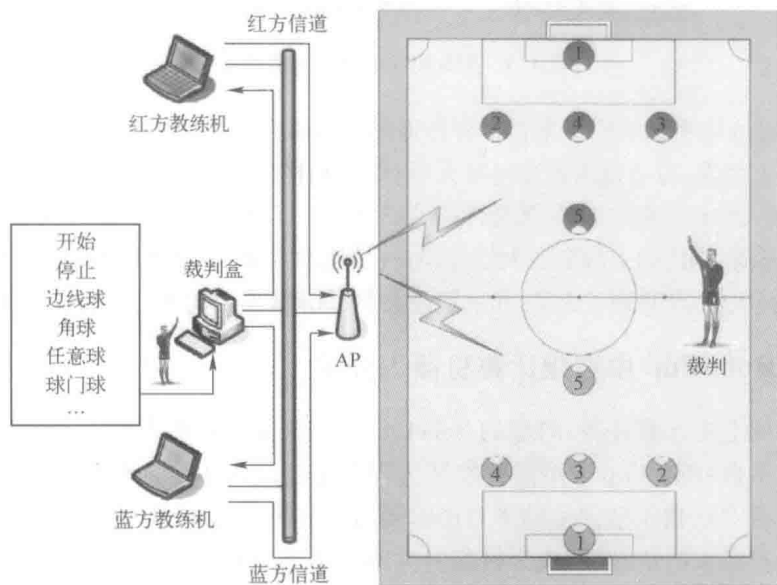


图 1.2 中型组比赛过程示意图

在目前的 RoboCup 各项赛事中，RoboCup 中型组比赛环境和规则，以及比赛对抗的激烈程度都是最接近人类比赛的，例如使用 5 号足球，球门使用与人类比赛类似的球网，比赛中人类对机器人的摆位等干扰也被禁止，机器人必须是完全自主的，比赛规则直接修改自 FIFA 足球比赛规则等。每年的 RoboCup 世界杯比赛结束后，RoboCup 理事会成员都会组成人类足球队与新科中型组足球机器人世界冠军开展一场人和机器人之间的对抗赛，以验证目前机器人技术发展水平与 RoboCup 最终目标的接近程度。同时 RoboCup 中型组还有进一步修改规则的计划，如为机器人穿上不同颜色的球衣，比赛用球改为使用任意 FIFA 足球，比赛走向户外人工草皮环境，机器人根据裁判哨音和手势进行比赛等。

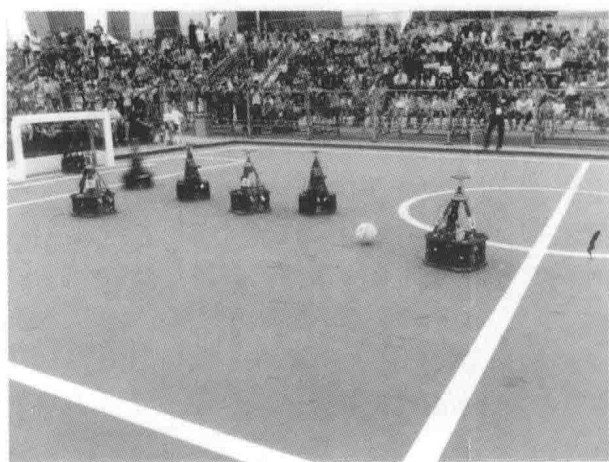


图 1.3 RoboCup 中型组比赛场景

RoboCup 中型组吸引了来自世界各地的众多研究机构的积极参与。国外的意大利米兰理工大学,荷兰爱因霍温科技大学,奥地利格拉茨理工大学,德国斯图加特大学、图宾根大学和卡塞尔大学,葡萄牙的阿威罗大学,日本大阪大学、庆应义塾大学和九州工业大学等,国内的上海交通大学、国防科学技术大学、华南理工大学、上海大学、北京信息科技大学、北京理工大学、北京工业大学、湖南大学等均先后参加过该赛事。

1.2.2 RoboCup 中型组比赛机器人介绍

为完成上述比赛任务,典型的 RoboCup 中型组足球机器人由以下部分组成:

移动平台:RoboCup 中型组的发展历程中主要使用了全向运动和双轮差动两种移动平台^[5]。由于全向运动平台能够随时向任何方向移动,因此相比较双轮差动平台具有极大的优越性,成为目前绝大部分中型组球队的选择。全向运动平台主要由全向轮、直流电机、轮系、电机驱动器和控制器等部分组成。

传感器:目前在 RoboCup 中型组球队中最经常使用的传感器是视觉传感器和电机编码器。大部分球队都使用全向视觉系统作为视觉传感器^[6]。全向视觉系统由摄像机和凸全向反射镜面组成,其中摄像机朝上正对着全向反射镜面,因此全向视觉系统也称为全景视觉或者折反射视觉系统。也有一些球队仅使用透视成像的单摄像机作为视觉传感器^[7]。很多球队同时使用了全向视觉系统、透视摄像机,或者双目立体视觉^[8]、Kinect^[9]等新的视觉传感器。机器人能够通过处理这些视觉传感器信息实现目标识别和目标跟踪。电机编码器则用于电机速度控制和航迹计算。机器人通过结合视觉传感器和电机编码器信息以及电子罗盘、惯性导航单元等信息实现在比赛场地上的精确自定位。

踢球装置:除部分参赛队的守门员机器人外,RoboCup 中型组足球机器人都安

装有踢球装置用于传球和射门。踢球装置一般分为气动射门装置^[10]、电磁铁螺线管储能射门装置^[11]和弹簧弩机储能射门装置^[12]等。

车载计算机:RoboCup 中型组足球机器人都携带计算机用于运行机器人的软件以实现图像处理、决策、路径规划、运动控制、多机器人协作等。车载计算机一般为笔记本电脑或者工控机。这些计算机同时也带有无线网卡用于机器人之间的无线通信。

带球装置:在早期的比赛中足球机器人都使用被动带球机构,被动带球机构在机器人向前运动时才能发挥作用,给机器人的运动控制增加了额外约束,不能充分发挥全向运动平台的优势。因此,被动带球装置已经逐步被主动带球系统所代替,主动带球系统包括主动带球机构和相应的控制系统,使机器人能更好地在运动过程中控球、抓球及接球。

其他必需的设备:其他设备如电池等也是 RoboCup 中型组足球机器人能够完成比赛所必需的。

一些典型的参赛机器人如图 1.4 所示,虽然这些机器人外观差别较大,但都由上述几大基本部分组成。

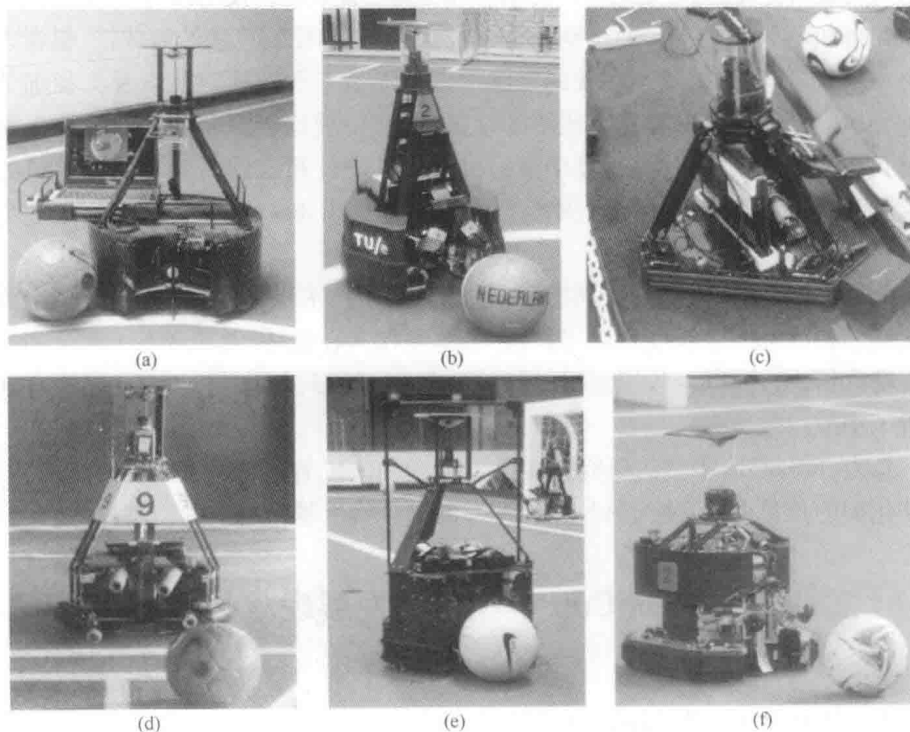


图 1.4 典型的参赛机器人

- (a) 葡萄牙 CAMBADA 队;(b) 荷兰 TU/e 队;(c) 日本 Hibikino - Musashi 队;
(d) 德国 Brainstormers - Tribots 队;(e) 中国 Water 队;(f) 中国 NuBot 队。

1.2.3 RoboCup 中型组的科学意义和工程价值

RoboCup 中型组机器人足球赛中涉及的研究内容包括机械结构设计^[5, 13]、实时图像处理^[14]、机器人视觉^[15, 16]、机器人自定位^[17]、目标识别与目标跟踪^[18, 19]、运动控制^[13, 20, 21]、移动机器人的控制体系结构^[22, 23]、路径和轨迹规划^[20]、机器学习^[24]、多机器人协调控制^[25-27]、多传感器信息融合^[28]等,因此 RoboCup 中型组比赛能够作为一个标准测试平台,检验机器人学和人工智能领域中的大量理论与方法。大量的新技术能够在 RoboCup 中型组足球赛中应用、集成和检验,RoboCup 中型组研究中的科技进展与成果也能直接应用于相关研究领域并提高这些领域的研究水平,包括机器人学、计算机视觉、模式识别、信号处理、人工智能、分布式人工智能、自动控制、机器学习、认知科学等。机器人自定位算法、规划和控制算法、学习算法、图像处理算法、软件结构、各种新传感器等新技术能够直接应用于服务机器人、工业机器人、自主车、智能交通系统、工业自动化等,这些都能够给社会生产和人们日常生活的诸多方面带来极大的帮助。由于 RoboCup 中型组机器人足球比赛是典型的多学科交叉研究,因此特别适合作为培养和提高研究人员科技创新能力的平台。

足球机器人系统平台的运动性能、机器人感知和控制算法的鲁棒性、机器人机械电气系统的可靠性,甚至系统的易维护性等大量工程技术问题以及工程细节问题均会极大地影响足球机器人比赛的结果,比赛中理论创新先进性的体现也需要通过工程技术实现来保障,因此中型组机器人软硬件系统的研制对研究人员的工程素养和解决实际问题的能力提出了很高的要求,RoboCup 中型组比赛是一个非常适合培养工程师的平台。

此外,通过研究人员的共同努力,随着机器人技术水平的提高,中型组比赛的对抗激烈程度和流畅程度日益提高,比赛越发扣人心弦,极大地激发了观众和媒体的观赛热情。以在荷兰埃因霍温举行的 RoboCup2013 为例,超过 5000 名观众现场观看了中型组的决赛。

总之,RoboCup 中型组研究正在机器人学和人工智能等相关领域的研究中扮演催化剂的角色,并且将为科技界和社会的进步作出越来越多的贡献。

1.3 RoboCup 中型组的发展现状与趋势

1.3.1 RoboCup 中型组发展现状

在研究人员的共同努力下,目前 RoboCup 中型组比赛呈现以下特点:

(1) 单个机器人的技术性能得到了很大提高。机器人具备优秀的速度和加速