

# 机器人视觉系统研究

郑志强 卢惠民 刘 斐 著



科学出版社

# 机器人视觉系统研究

郑志强 卢惠民 刘 斐 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

视觉系统能够提供丰富的环境感知信息,是自主移动机器人最为重要的环境感知系统之一。本书以机器人足球世界杯 RoboCup 中的中型组足球机器人系统为背景,描述了国防科学技术大学机器人足球研究组十年来在足球机器人实时动态视觉感知问题上的研究成果和最新进展,主要内容包括:视觉系统设计与标定、颜色编码化和非颜色编码化目标识别、目标跟踪与状态估计、视觉自定位等。

本书主要成果均在实践中尤其是实际中型组机器人足球比赛中得到了充分应用和检验,较好地解决了机器人视觉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、计算机/机器人视觉、图像处理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

机器人视觉系统研究/郑志强,卢惠民,刘斐著. —北京:科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-045736-6

I. ①机… II. ①郑… ②卢… ③刘… III. ①机器人-视觉-研究  
IV. ①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124358 号

责任编辑:张海娜 罗 娟/ 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100000

http://www.sciencep.com

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 6 月 第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:13 1/4 彩插:2

字数:264 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

机器人足球世界杯(Robot Soccer World Cup,简称 RoboCup)为人工智能和智能机器人研究提供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、多机器人协调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、RoboCup 救援组机器人系统等的研制工作,突破了多项关键技术,取得了一系列研究成果,在 *Pattern Recognition*、*Mechatronics*、*Advanced Robotics*、《自动化学报》、《机器人》、IEEE ICRA、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 7 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 2 次,获得技术挑战赛季军 2 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。研究小组成员 3 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。

视觉系统为人类提供了约 75% 的外界信息。视觉系统也已成为了各种自主移动机器人最为重要的环境感知系统之一,能够为其提供丰富的环境感知信息。视觉感知作为中型组足球机器人最重要的比赛环境感知方式,是支撑足球机器人完成自主决策控制的基础性问题。本书内容紧扣中型组足球机器人视觉感知系统设计与信息处理,涵盖了 RoboCup 中型组足球机器人视觉感知研究的主要方面,如视觉系统设计与标定、颜色编码化和非颜色编码化目标识别、目标跟踪与状态估计、视觉自定位等,是课题组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是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视觉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 国际和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、计算机/机器人视觉、图像处理、模式识别等方向研究的同行,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。

本书是研究组郑志强教授、张辉教授、卢惠民副教授、李迅副教授,已毕业的博士刘斐、柳林、季秀才、舒文杰、耿丽娜、海丹、王祥科、肖军浩、杨绍武,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、孙方义、卢盛才、崔连虎、董鹏、邬林波、程帅、郑小祥、崔清柱,在读硕士生杨祥林、代维等在内所有成员的集体智慧的结晶。

研究组在开展机器人足球研究的过程中,得到了国防科学技术大学机电工程与自动化学院和自动控制系的大力支持,尤其感谢学校训练部外事处在出国竞赛交流经费上提供的资助,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”和学院及系里在军队重点实验室“机器人足球系统研究及学术交流”等项目上的大力资助,感谢杨俊教授、刘锋参谋、朱群参谋、李丽刚参谋、董霖参谋、辛华参谋、张立杰参谋、吕云霄参谋等提供的帮助。

限于作者水平,书中难免会有不足之处,热切地希望得到各位读者的宝贵意见。作者的 E-mail 地址是:zqzheng@nudt.edu.cn 和 lhmnew@nudt.edu.cn。

作 者

2015 年 3 月于长沙

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 机器人足球世界杯 .....	1
1.2 RoboCup 中型组比赛与中型组机器人 .....	2
1.2.1 RoboCup 中型组比赛介绍 .....	2
1.2.2 RoboCup 中型组比赛机器人介绍 .....	3
1.2.3 RoboCup 中型组的科学意义和工程价值 .....	5
1.3 RoboCup 中型组视觉感知研究现状 .....	5
1.3.1 视觉系统设计及其标定 .....	6
1.3.2 机器人的目标识别 .....	7
1.3.3 目标运动状态估计 .....	10
1.3.4 机器人的视觉自定位 .....	11
1.3.5 多机器人协同感知 .....	12
1.4 RoboCup 中型组视觉感知的发展趋势 .....	13
1.5 本书内容安排 .....	14
参考文献 .....	15
<b>第 2 章 足球机器人全向视觉系统设计与标定</b> .....	21
2.1 全向视觉概述 .....	21
2.1.1 多摄像机拼接全向视觉系统 .....	21
2.1.2 鱼眼镜头全向视觉系统 .....	22
2.1.3 折反射式全向视觉系统 .....	23
2.2 足球机器人全向视觉系统的设计 .....	24
2.2.1 单视点全向视觉系统的设计 .....	24
2.2.2 NuBot 全向视觉系统的设计 .....	29
2.3 足球机器人全向视觉系统的标定 .....	36
2.3.1 单视点全向视觉系统的标定 .....	37
2.3.2 NuBot 全向视觉系统的标定 .....	38
2.4 本章小结 .....	46
参考文献 .....	46
<b>第 3 章 机器人足球中的颜色编码化目标识别</b> .....	50
3.1 摄像机参数自动调节 .....	50

3.1.1	相关研究	51
3.1.2	图像熵及其与摄像机参数的关系	52
3.1.3	基于图像熵的摄像机参数自动调节算法	57
3.1.4	实验结果与分析	59
3.1.5	算法的拓展应用	65
3.1.6	小结	69
3.2	足球机器人视觉系统颜色分类	70
3.2.1	颜色空间模型与查找表方法简介	70
3.2.2	混合颜色空间查找表分类方法	73
3.2.3	基于线性分类器的颜色空间划分方法	79
3.2.4	改进的颜色查找表方法在彩色全景图像颜色分类中的应用	83
3.2.5	小结	86
3.3	针对颜色编码化目标的识别算法	86
3.3.1	机器人足球比赛中的目标识别	87
3.3.2	场地白色标示线的可靠识别	90
3.3.3	黑色障碍物的可靠识别	99
3.4	本章小结	104
	参考文献	104
<b>第4章</b>	<b>机器人足球中的非颜色编码化目标识别</b>	<b>107</b>
4.1	相关研究	107
4.2	基于全向视觉成像模型的任意足球识别	108
4.2.1	足球在 NuBot 全向视觉中的成像特性分析	109
4.2.2	基于全向视觉的任意足球识别算法	111
4.2.3	实验结果与分析	113
4.2.4	小结	118
4.3	基于 AdaBoost 学习算法的任意足球识别	119
4.3.1	算法描述	119
4.3.2	实验结果与分析	125
4.3.3	小结	132
4.4	本章小结	134
	参考文献	134
<b>第5章</b>	<b>目标跟踪与状态估计</b>	<b>136</b>
5.1	基于当前统计模型与状态约束的单目标跟踪	137
5.1.1	足球机器人的运动特点	137
5.1.2	目标运动模型	139
5.1.3	滤波器约束条件	144
5.1.4	单目标跟踪滤波器	147

---

5.1.5	实验结果与分析	149
5.1.6	小结	151
5.2	基于联合概率数据关联的多目标跟踪	151
5.2.1	椭圆跟踪门规则	152
5.2.2	数据关联算法的选择	153
5.2.3	实验结果与分析	156
5.2.4	小结	161
5.3	基于 RANSAC 和 Kalman 滤波的目标状态估计	161
5.3.1	球速估计问题研究现状	162
5.3.2	RANSAC 介绍	162
5.3.3	基于 RANSAC 和 Kalman 滤波的球速估计算法	163
5.3.4	实验结果与分析	166
5.3.5	小结	168
5.4	基于双目视觉的三维空间目标状态估计	170
5.4.1	双目视觉系统	171
5.4.2	足球识别与定位	172
5.4.3	足球运动轨迹的拟合	173
5.4.4	足球运动落点位置的预测	174
5.4.5	机器人运动决策	175
5.4.6	实验结果与分析	176
5.4.7	小结	182
5.5	本章小结	183
	参考文献	183
<b>第 6 章</b>	<b>足球机器人视觉自定位</b>	<b>186</b>
6.1	足球机器人常用的视觉自定位方法	187
6.1.1	粒子滤波定位方法	187
6.1.2	匹配优化定位方法	192
6.1.3	两种自定位方法的优点和不足	192
6.2	结合使用粒子滤波和匹配优化的机器人自定位方法	193
6.3	实验结果与分析	194
6.3.1	遮挡情况下的自定位	194
6.3.2	全局自定位	197
6.3.3	不同光线条件下的自定位	197
6.3.4	算法的实时性能	200
6.4	本章小结	201
	参考文献	201



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机器人足球世界杯

RoboCup<sup>[1]</sup>是国际上一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<sup>[2]</sup>,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,特别是机器人相关机电产品的展览会。RoboCup 世界杯比赛吸引了来自世界各地的众多研究机构的积极参与,以在荷兰埃因霍温举行的 RoboCup2013<sup>[3]</sup>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赛事。

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主要面向机器人的应用,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)。

## 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<sup>[4]</sup>允许每支球队最多 5 个外形尺寸为正方形边长不超过 52cm、高度不超过 80cm 的机器人在 18m×12m 的绿色场地上使用橙色(或黄色)标准 5 号足球进行比赛。所有的传感器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(教练机)进行通信。除了机器人上下场,不允许人类对比赛进行任何额外的干预。因此,机器人是全分布式和全自主的。机器人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,并使用自身携带的计算机自主完成自身的决策控制,实现与队友的协调与协作等,以共同完成比赛任务。每场比赛分成两个 15min 的半场。比赛过程由人类裁判控制,主裁判具有绝对的权威贯彻比赛规则的执行。同时,设置一个助理裁判负责操作裁判盒程序(referee box),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、界外球、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 1.1 所示,典型比赛场景如图 1.2 所示。

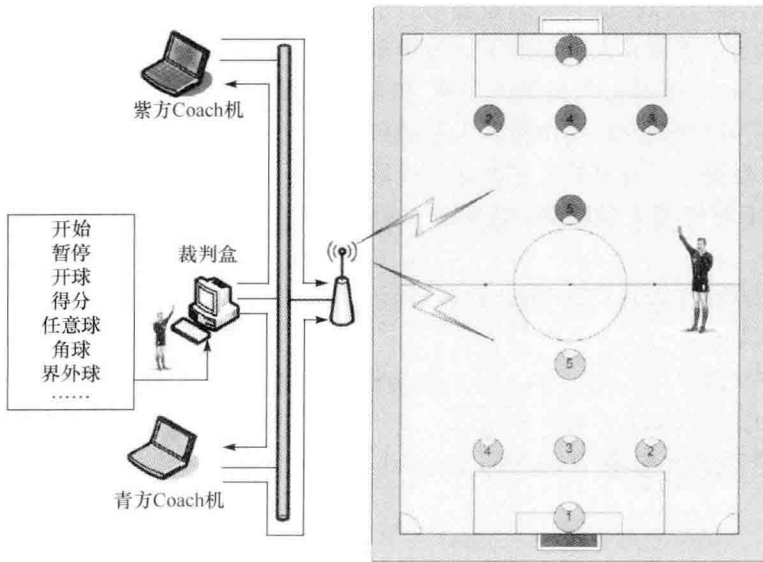


图 1.1 中型组比赛过程示意图



图 1.2 RoboCup 中型组比赛场景

图中机器人均携带全向视觉系统

在目前的 RoboCup 各项赛事中,RoboCup 中型组比赛环境和规则、比赛对抗的激烈程度都是最接近人类比赛的,如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操作也被禁止,机器人必须是完全自主的,比赛规则由国际足球联合会(FIFA)足球比赛规则修改而来等。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当年中型组足球机器人世界冠军开展一场“人-机器人对抗赛”,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 中型组技术委员会还会进一步修改规则的路线图,以引导相关技术的进步,如允许为机器人穿上不同颜色的球衣,比赛用球改为使用任意的标准 FIFA 5 号足球,在户外环境比赛,机器人根据裁判哨音和手势进行比赛等。

RoboCup 中型组吸引了来自世界各地众多研究机构的积极参与。国外的意大利米兰理工大学,荷兰埃因霍温科技大学,奥地利格拉茨理工大学,德国斯图加特大学、图宾根大学及卡塞尔大学,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、广东工业大学、北京信息科技大学、北京理工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:**在 RoboCup 中型组主要有全向移动和双轮差动两种移动平台<sup>[5]</sup>。由于全向移动平台能够随时向任何方向移动,相比较双轮差动平台具有极大的灵活性,所以成为目前绝大部分中型组球队的选择。全向移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。全向视觉系统由摄像机和凸全向反射镜面组成,其中摄像头朝上正对着全向反射镜面,因此全向视觉系统也被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<sup>[6]</sup>。还有很多球队同时使用了全向视觉系统和透视摄像机<sup>[7-10]</sup>。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可实现在场地上的自定位。

踢球装置: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<sup>[11]</sup>、电磁铁螺线管储能射门装置<sup>[12]</sup>和弹簧弩机储能射门装置<sup>[13]</sup>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。

其他必需的设备:其他设备,如电池、带球装置等,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 1.3 所示。

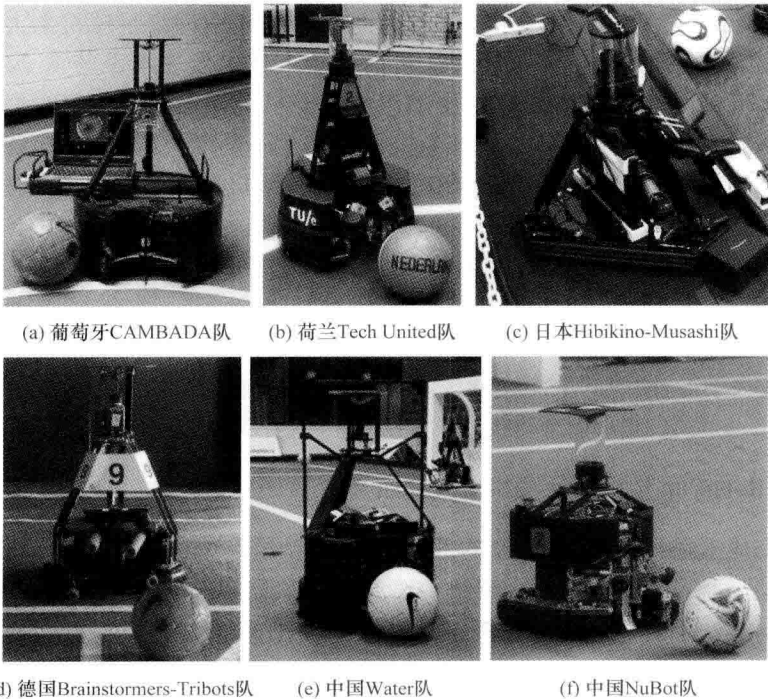


图 1.3 典型的参赛机器人

### 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<sup>[5, 14]</sup>、实时图像处理<sup>[15]</sup>、机器人视觉<sup>[16, 17]</sup>、机器人自定位<sup>[18]</sup>、目标识别与目标跟踪<sup>[19, 20]</sup>、运动控制<sup>[14, 21, 2]</sup>、移动机器人控制体系结构<sup>[23, 24]</sup>、路径和轨迹规划<sup>[21]</sup>、机器学习<sup>[25]</sup>、多机器人协调控制<sup>[26-28]</sup>、多传感器信息融合<sup>[29]</sup>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。这些相关研究领域包括机器人学、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帮助。

总之,RoboCup 中型组研究能够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,并且能够为科技和社会的进步做出越来越多的贡献。

## 1.3 RoboCup 中型组视觉感知研究现状

RoboCup 中型组足球机器人是全分布式的和全自主的,机器人系统的所有传感器都由机器人本体携带,感知信息的采集、处理也由机器人的车载计算机完成。目前,中型组足球机器人使用的传感器主要包括视觉系统、电机编码器、电子罗盘、陀螺仪等。其中,由于视觉系统相对廉价,并且能够提供最为丰富的感知信息,所以视觉感知成为了中型组机器人最重要的比赛环境感知方式,主要用于实现机器人的目标识别、状态估计、自定位等。全向视觉系统具有  $360^\circ$  的水平视场角,能够获取机器人周围场地的全景图像,经过图像处理可实现目标识别,并融合电机编码器等其他传感器信息,实现机器人的自定位,以提供机器人决策控制所需要的环境感知信息。因此,该系统已经成为中型组足球机器人最重要的传感器<sup>[30]</sup>,近几年,几乎所有的中型组参赛队的足球机器人都装有全向视觉系统(图 1.2 和图 1.3)。RoboCup 中型组比赛也为全向视觉技术的研究和应用提供了一个标准的测试环境,大大促进了全向视觉技术的研究和发展。

本节分别从视觉系统设计及标定、目标识别、目标运动状态估计、机器人视觉自定位、多机器人协同感知等几个方面详细综述目前 RoboCup 中型组足球机器人在比赛环境的视觉感知上的研究现状。

### 1.3.1 视觉系统设计及其标定

折反射式全向视觉系统是 RoboCup 中型组足球机器人使用最为广泛的视觉传感器,几乎所有的中型组机器人都安装了这种传感器。折反射式全向视觉系统由全向反射镜面和摄像机组合而成<sup>[31, 32]</sup>,其中全向反射镜面起着反射光线的作用,而摄像机则通过镜头折射,采集全向反射镜面反射的光线来获取全景图像。该系统具有 360°的水平视角,能够获取机器人周围场地的全景图像,经过图像处理可实现目标识别,并融合电机编码器等其他传感器信息实现机器人的自定位,以提供机器人决策控制所需要的环境感知信息。该系统是中型组足球机器人最重要的传感器(目前 RoboCup 中型组中有部分球队还使用仅由透视成像摄像机构成的局部前向视觉系统来实现对机器人前方环境的感知,以起到辅助全向视觉的作用,该系统的摄像机内外参数标定往往使用现有成熟的标定工具箱,因此本节对其不进行详细介绍,仅讨论全向视觉的设计与标定)。

全向反射镜面的形状对全向视觉系统的成像特性有着决定性的影响。根据成像原理的不同,全向视觉系统可分为单视点成像和非单视点成像的全向视觉,其中单视点全向视觉又可分为使用双曲线形镜面、椭球形镜面和抛物线形镜面的全向视觉系统;非单视点全向视觉又可分为使用圆锥形镜面、球形镜面、水平等比和垂直等比镜面等的全向视觉系统。文献[31]中详细介绍了使用圆锥形镜面、球形镜面、椭球形镜面、抛物线形镜面以及双曲线形镜面等的全向视觉的成像原理和特性,文献[33]则设计了三种成像分辨率不变的镜面,即水平等比镜面、垂直等比镜面和角度等比镜面,能够分别实现水平面、垂直面和角度上的场景成像的分辨率不变。

目前在 RoboCup 中型组机器人上使用最多的是双曲线形镜面,如德国 Brainstormers-Tribots 队<sup>[11]</sup>及 RFC Stuttgart 队<sup>[10]</sup>、荷兰的 Tech United 队<sup>[9]</sup>和葡萄牙 CMBADA 队<sup>[34]</sup>等。这种镜面的主要缺陷是成像分辨率随着与机器人距离的增大而降低,远处场景成像太小,不利于机器人进行大范围的目标识别。葡萄牙的 ISocRob 队、意大利的 Milan 队等联合设计和使用了一种从内至外分别由水平等比镜面、固定斜率镜面和平面镜组成的组合镜面<sup>[35]</sup>。我国 NuBot 队则设计实现了一种从内至外分别由双曲线形镜面、水平等比镜面和垂直等比镜面组成的新型组合镜面<sup>[36, 37]</sup>,能够实现机器人近处水平场景的成像分辨率不变且远处垂直场景的成像变形较小,同时对接近机器人的周围场景包括机器人自身也具有清晰的成像。

全向视觉系统只有经过距离标定才能完成视觉测量。近年来,单视点全向视觉系统的标定方法得到了较为深入的研究<sup>[38-41]</sup>,Mei 和 Scaramuzza 等分别开发了用于此类全向视觉系统标定的 MATLAB 工具箱。但这些标定方法都假设全向反射镜面中心轴与摄像机主轴重合,并且镜面具有各向同性。由于视觉系统的安装

精度和全向反射镜面加工精度等因素的限制,并且激烈比赛中的机器人冲撞会给全向视觉系统带来剧烈冲击,上述假设往往难以成立,使得研究对象并不满足单视点成像模型,这会对标定精度带来较大的影响。

文献[42]研究了不满足单视点成像模型的全向视觉系统的标定方法,取消了镜面中心轴与摄像机主轴重合的约束,但仍然假设镜面各向同性。文献[43]和[44]提出基于镜面曲线的几何性质,通过光路反推追踪来标定全向视觉系统,由机械安装不精确和使用低成本摄像机造成的非单视点成像影响能被有效补偿。德国的 Brainstormers-Tribots 队提出了一种在整个图像平面上利用一系列已知距离映射关系的插值基点进行插值计算以实现全向视觉系统标定的思想,使得在标定过程中不再需要进行上述假设<sup>[45]</sup>。我国 NuBot 队借鉴并实现了这一标定方法的思想,通过 Canny 算子提取出已知标定板上的插值基点,并使用二维 Lagrange 插值实现了 NuBot 全向视觉系统高精度的距离标定<sup>[46]</sup>,较大地提高了机器人基于全向视觉的自定位精度。

### 1.3.2 机器人的目标识别

尽管根据现行比赛规则,蓝、黄色的球门和立柱被取消,但中型组的比赛环境仍然是高度颜色编码化的,能够识别黄色足球、绿色场地、白色标志线、黑色机器人及洋红色、青色机器人色标等目标是足球机器人的基本能力。由于 RoboCup 的最终目标是机器人足球队能够打败人类足球世界冠军,足球机器人最终要能够在光线条件高度动态的室外环境下进行足球比赛,而且目前的比赛规则对室内比赛环境的光线条件限制得也越来越少,自然光线对比赛环境的影响越来越大,所以如何使足球机器人的视觉系统能够在动态的光线条件下鲁棒地识别各种彩色目标,甚至能够完全不依赖于颜色信息地完成任意 FIFA 足球等目标的识别,成为足球机器人视觉目标识别的主要研究内容。各国研究人员分别从如下几个方面开展了针对该问题的研究工作。

#### 1. 图像采集

在图像采集上,通过自动调节摄像机的图像采集参数使输出的图像能够在不同的光线条件下尽可能一致地描述真实的场景,从而使视觉系统的目标识别对光线条件具有较强的鲁棒性。文献[47]将摄像机参数调整问题定义为一个优化问题,并使用遗传算法来最小化人工选定的图像区域中像素的实际颜色值和理论颜色值的距离,即可获得该问题的最优解。由于理论颜色值被用作参考值,所以光线条件的影响可以被消除,但是该方法需要用户人工地选择一些特殊的图像区域。日本的 Trackies 队使用一组 PID 控制器,根据在全向视觉系统中始终可见的白色区域中的像素颜色值来调整摄像机参数,如增益、光圈和两个白平衡通道<sup>[48]</sup>。荷兰的 Tech United 队设计了 PI 控制器来调整曝光时间,把参考绿色区域的颜色值

调整到期望的颜色值<sup>[49]</sup>。葡萄牙 CAMBADA 队则提出了根据全景图像及图像上已知位置的黑色和白色区域的亮度直方图来自动配置其全向视觉系统的图像获取参数<sup>[50]</sup>,该方法需要在地面上放置包含黑色和白色区域的色块,只能应用于比赛前离线的标定。上述方法在调节过程中都需要某些特殊的参考颜色,我国 NuBot 队提出了一种基于图像熵的摄像机自动调节方法<sup>[51, 52]</sup>。该方法首先定义了图像熵,并通过实验分析验证了图像熵能够表征摄像机参数设置是否合适,然后根据图像熵优化摄像机参数,使机器人视觉能够自适应于不同的光线条件。使用全向视觉系统在室内 RoboCup 中型组环境和户外类似 RoboCup 环境下的实验结果表明,通过使用该方法,视觉系统的图像输出具有一定的恒常性,且该方法在调节过程中无需任何参考颜色,能够更广泛地应用于其他计算机/机器人视觉中的视觉系统自动调节问题中。

## 2. 颜色标定学习

在视觉系统的颜色标定学习上,传统的基于离线的人机交互界面选择确定颜色分类阈值<sup>[53]</sup>或者生成颜色查找表的方法<sup>[54, 55]</sup>不能完全满足在变化的光线条件下鲁棒的完成颜色分割和目标识别的需要<sup>[56]</sup>,而且离线的标定往往也比较耗时,因此研究人员又先后提出了多种在线的视觉自动颜色标定学习方法<sup>[57-59]</sup>,这些方法一般都需要通过不依赖于颜色分类地提取出场地白线点以实现机器人自定位后,再根据已知的环境模型(即已知各种目标的位置),搜索或者提取出各种目标区域,进而建立颜色查找表完成颜色自动标定,同时在比赛过程中还可以动态实时地修改颜色查找表以适应光线条件的变化。

## 3. 图像处理

在图像处理上,研究人员提出了通过处理或者变换图像以实现某种视觉的恒常性,如通过 Retinex 算法使处理后的图像具有一定的颜色恒常性<sup>[60]</sup>,从而提高颜色分类和目标识别对光线条件变化的鲁棒性。但这种方法往往具有较大的计算量,并不真正适合应用于 RoboCup 中型组比赛这种高度动态的环境。文献<sup>[61]</sup>则提出将图像数据从 YUV 空间转换到一种新的 TSL\* 空间,并使用进化算法来优化转换参数,使颜色分割能够更加快速鲁棒和精确地完成。在光线条件变化时,该方法不调整颜色分割的阈值,而是进化颜色模型转化的最优参数。

## 4. 图像分析和理解

在图像分析和理解上,传统的方法是首先进行颜色分割,再使用区域生长或者游程编码等算法提取目标,RoboCup 中型组比赛环境中越来越多的动态光线条件给这种方法带来了很大的挑战。研究人员先后提出了多种不完全依赖于传统颜色



分割的足球机器人目标识别算法<sup>[48, 62, 63]</sup>。文献[48]首先使用 Markov 随机场进行全景图像的区域分割,再假设颜色分布满足高斯概率模型,进而通过比较像素颜色值与所有颜色类高斯分布的最小 Mahalanobis 距离来实现图像的颜色分类,室内和室外环境下的实验验证了该方法的有效性。文献[62]提出了一种用于局部视觉的鲁棒的橙色足球识别方法。该方法基于 UV 空间的颜色统计图,采用 Bayes 分类器根据最大后验概率进行颜色分类,最后通过随机 Hough 变换提取出球,进而调整足球颜色值的概率分布以适应光线条件的变化。

近年来,不依赖于颜色分类的目标识别算法成为了足球机器人视觉的研究重点,特别是对任意 FIFA 足球的识别<sup>[64-72]</sup>。文献[64]~[66]提出了一种 CCD(contracting curve density)算法,该算法通过使用图像的局部统计特性来进行带参数的曲线模型与图像数据之间的匹配,进而搜索出任意的目标足球与背景图像之间的轮廓。该方法需要已知足球的大致位置,因此无法实现足球的全局检测。文献[67]借鉴了人脸识别中的 Adaboost 特征学习算法,并将其与粒子滤波算法相结合,实现了在复杂环境下不依赖颜色信息的足球实时检测和跟踪。文献[68]提出将边缘提取后的图像信息作为 Adaboost 学习算法的输入并构建多层分类器和回归树,以实现快速的任意足球检测,该方法能够在不同环境下检测出不同的足球,但是当环境中存在其他圆形物体时,该方法的误检率也较高,因此文献[69]提出将该方法与一种受生物学启发的视觉注意机制相结合,有效地降低了误检率。文献[70]则提出了一种基于图像边缘的弧匹配方法检测圆形进而完成足球的识别。Bonarini 等首先对图像做颜色不变性变换和边缘提取后,再使用圆 Hough 变换检测普通足球,并使用 Kalman 滤波器跟踪和预测足球的位置,以降低算法计算量<sup>[7]</sup>。文献[73]提出了一种 Hough 变换改进算法,使用结构张量技术(structure tensor technique)来完成不依赖颜色信息的足球检测,但是该方法计算量较大,无法在机器人上实时应用。

上述方法都是基于机器人的局部视觉系统,其视野和图像的复杂程度都远小于全向视觉系统,因此研究人员又研究了利用全向视觉进行任意足球的识别。文献[10]和[71]根据足球在其使用双曲面形镜面构成的全向视觉中的成像为圆形的特点,先使用边缘检测算法提取出全景图像的边缘信息,再使用圆 Hough 变换方法检测出圆,最后使用各自提出的有效验证方法确认所检测出的圆是否为足球。实验结果表明,这两种方法的正确检测率都很高,但是其所有的实验都是在基本无复杂背景干扰的环境下进行的。NuBot 队提出了一种基于其全向视觉系统的任意足球识别算法<sup>[36, 72]</sup>,该算法首先推导了足球在其全向视觉系统中的成像特性,得出结论为足球近似成像为椭圆,并推导了图像不同位置处椭圆的形状参数。在图像处理中,该方法根据所推导的成像特性定义了径向扫描和旋转扫描来搜索由足球所成像的椭圆,进而完成对任意足球的全局检测,最后该方法还结合球速估计