

足球机器人系统与比赛

第一章 绪论

1.1 机器人足球及其发展

在人工智能的研究方面,40 年代提出了用计算机与人类下棋的目标,经过 50 年的努力,在逻辑思维、博弈等的研究以及高性能计算机的发展等方面实现了飞跃。终于在 1996 年 5 月,IBM 计算机“深蓝”(Deep Blue)战胜了国际象棋世界冠军卡斯帕罗夫,实现了研究人员 50 年的梦想。

如果说,IBM“深蓝”计算机战胜特级象棋大师卡斯帕罗夫是人工智能学科的一个里程碑,表明机器可以战胜人类天才,那么机器人足球就是人工智能学科另一个最具挑战性的课题。机器人足球赛,顾名思义,就是制造和训练机器人进行足球比赛。通过这种方式来提高人工智能领域、机器人领域的研究水平。

Alan Mackworth(University of British Columbia, Canada)于 1992 年在其文章《On Seeing Robots》中,提出机器人足球比赛是很好的机器人和 AI 研究的实验平台。同时,还有一些学者也提出了这个问题。这一提议得到了广泛的赞同。韩国学者金钟焕教授于 1996 年开始主办微型机器人足球比赛(MiroSot);日本的学者北田宏明提出了机器人世界杯足球赛(RoboCup),在众多学者的努力下,1997 年 8 月 23-29 日,第一届 Robocup 比赛及会议在日本的名古屋举行。设计机器人进行足球比赛是很有挑战性的工作,激发了大家极大的研究兴趣。到 1998 年 4 月,共有 22 个国家 1000 多名研究人员在进行此方面的研究工作。

目前,国际上机器人足球已发展为两大系列,一是由国际机器人足球联合会(Federation of International Robot-soccer Association, FIRA)组织的微型机器人世界杯足球赛(RWC—Robot Soccer World Cup);另一个是由国际人工智能学会组织的机器人世界杯足球赛(RoboCup)。

1.1.1 FIRA 的发展

国际机器人足联成立于 1997 年 6 月 5 日,总部设在韩国大田的韩国科学院(KAIST)。从 1996 年开始,FIRA 每年组织一次机器人足球世界杯赛(FIRA RWC),相伴而行的还要举办这一领域的学术研讨会(WORKSHOP),相互学习与竞争,使得参赛国家与代表队迅速增加。比赛项目(见表 1-1)也不断丰富。

MiroSot'96 于 1996 年 11 月 9~12 日在韩国大田(Taejon)KAIST 举行,有 7 个国家的 23 支代表队参赛。美国的 Newton Research Lab 队获得 MiroSot 冠军,瑞典的 Lami 队获得 S-MiroSot 的冠军。FIRA RWC'97 在韩国举行,2 个比赛项目,来自 9 个国家的 22 个队参赛。美国的 Newton Research Lab 队再次获得 MiroSot 冠军,汉城 UFO 队获得 S-MiroSot 的冠军。第 16 届足球世界杯赛期间,FIRA RWC'98 在巴黎举行,由 13 个国家的 39 个队参加了四个项目的决赛阶段的比赛。MiroSot 和 S-MiroSot 的冠军都是韩国 Human

Interface 公司的 The Keys 队。由于参赛队增加，FIRA RWC'99 首先分四个大区（北美，南美，亚太，欧非）进行预选赛，角逐决赛阶段 4 个项目的 32 个名额，比赛已达到相当的规模 and 水平。决赛于 8 月 4 日至 8 日在巴西坎皮那斯举行，MiroSot 冠军是：韩国大学和 RobotIS.Co 公司的 RobotIS 队、标准动作(Benchmark Tests)的冠军是我国东北大学的新 NEU 队。FIRA RWC'2000 于 9 月 18 日至 24 日在澳大利亚的举行，与 2000 年悉尼奥运会相伴而行。来自澳大利亚、加拿大、中国和韩国等国家的 13 支球队参加了这次比赛。这次比赛中，进行了 MiroSot 和 S-MiroSot 类别的比赛，MiroSot 的前三名全是韩国的球队。我国哈尔滨工业大学的机器人获得标准动作(Benchmark Tests)的冠军。FIRA RWC'2001 于 2001 年 8 月在我国首都的中国科学技术馆举办，我队利用自己开发研制的微型机器人控制器组成机器人小车系统，获队列比赛项目第 3 名，标准动作第 4 名。FIRA RWC'2002 于 2002 年 5 月 23 到 29 日在韩国举行。

表 1-1 FIRA RWC 的主要比赛项目

		机 器 人		场 地	
项 目	名 称	尺 寸	队员数	尺 寸	球
NaroSot	超微机器人足球赛	4 × 4 × 5.5	5	130 × 90	乒乓球
S-MiroSot	单微机器人足球赛	7.5 × 7.5 × 7.5	1	150 × 130	高尔夫球
MiroSot(小型联盟)	微型机器人足球赛	7.5 × 7.5 × 7.5	3	150 × 130	高尔夫球
MiroSot(中型联盟)	微型机器人足球赛	7.5 × 7.5 × 7.5	5	220 × 180	高尔夫球
RoboSot	小型机器人足球赛	20 × 20 × 40	3	220 × 150	曲棍球
HuroSot	拟人机器人足球赛	15 × 40(有 2 条腿)	动作测试		

1.1.2 RoboCup 的发展

1993 年 6 月，日本的北野宏明和浅田埏等学者发起创办了日本机器人足球赛，暂时命名为 RoboCup J 联赛，J 联赛是日本足球职业联赛的名称，前面冠以 RoboCup 即成为日本机器人足球赛的名称。当日本准备举办机器人足球赛的消息公布之后，在世界上引起了巨大的反响，许多国家的科研机构、高等学府和人工智能学研究者都表示有兴趣派出机器人足球队参赛，并建议日本学者将日本机器人足球赛扩大成为国际性的比赛。因此，该比赛改名为机器人世界杯足球赛，简称为 RoboCup。

1997 年 8 月 25 日，首届机器人世界杯足球赛在日本名古屋举行，国际人工智能大会也同期召开，这是久负盛名的国际最高级别的人工智能学术会议。世界一流的人工智能学者云集名古屋，他们与观众一起观赏了来自美国、日本、欧洲和澳洲的 40 多支机器人足球队的精彩比赛。第一届 RoboCup 比赛分为三组：小型机器人比赛、中型机器人比赛和计算机仿真比赛，共有超过 40 支球队参加了这三种比赛。1998 年 7 月 4-8 日，在法国巴黎举办了第二届 RoboCup 比赛及会议。共有超过 80 支球队参加比赛(40 支仿真队、12 支小型机器人队、16 支中型机器人队和 3 支有腿机器人队)。1999 年 7 月，第三届机器人足球世界杯赛在瑞典斯德哥尔摩举行，这次共有 90 多支足球队参赛，另外引人注目的是一些世界著名的一流大

学、科研机构和大公司都参与了这次比赛和相关活动，如美国卡内基-梅隆大学、康奈尔大学、美国国立研究机构(NASA)和日本索尼公司等。2000年8月28日-9月3日，第四届机器人足球世界杯赛在澳大利亚的墨尔本举行。2001年8月2-10日，在美国西雅图举行了第五届机器人足球世界杯赛，同时也召开了国际人工智能联合会议(IJCAI-21)，我国的清华大学代表队夺得仿真组的冠军。2002年6月17-25日，第六届机器人足球世界杯赛在日本福岡举行，参加这次机器人世界杯大赛的队伍来自29个国家和地区，共有188支球队，清华大学代表队蝉联仿真组冠军。

目前，国际 RoboCup 联合会已经成为世界上最著名的机器人足球国际组织，它的总部设在瑞士，总共有将近40个成员国参加，在世界机器人足球界的影响最大。该联合会的现任主席是曾荣获国际人工智能最高奖——计算机与思维大奖的著名科学家北野宏明。作为最具权威性的国际机器人足球组织，该联合会负责组织每年一届的国际性机器人足球世界杯赛以及相关的学术研讨活动。

机器人世界杯足球赛的比赛项目主要有以下五种：

计算机仿真足球赛 (Simulation league)

计算机模拟足球比赛的框架程序 (Server 软件) 由组委会编制。参赛双方提供决策对策软件 (即 Client 软件)。通过策略软件指挥屏幕上的运动员进行比赛。在这种比赛中没有实际的机器人参与，参赛双方各派 11 个自主的软件智能体 (autonomous software agents) 进行比赛。

小型机器人足球赛 (Small-size robot league)

比赛有两支球队参加，每队的参与的机器人数目不能超过 5 个。机器人的尺寸就在一个直径为 18cm 的圆柱体范围内，并且高度最大为 22.5cm，场地大小为 2.9m × 2.4m。

中型机器人足球赛 (Middle-size robot league)

要求参加比赛机器人的直径限制在 60cm × 60cm，高度必须在 30cm 与 80cm 之间，机器人的重量不能超过 80kg。

四腿机器人足球赛 (Four-legged robot league)

四腿机器人足球赛用 SONY 的爱宝机器人进行比赛。

拟人机器人足球赛 (Humanoid league)

1.1.3 我国足球机器人的发展

1999年4月，中国机器人足球 FIRA 分会正式成立。1999年6月，经国际 RoboCup 联合会授权，我国清华大学和中国科技大学共同发起成立了国际 RoboCup 联合会中国分会筹备委员会。FIRA 与 RoboCup 的最大区别在于 FIRA 主要是集中控制，而 RoboCup 是分布式控制。国内在机器人硬件方面的研究基本上都属于 FIRA 系列，最早着手开发的是东北大学，其他还有哈尔滨工业大学、中南大学、国防科大等等。RoboCup 系列以清华大学和中国科技大学为主，但主要限于仿真方面和四足索尼机器狗。

我国东北大学和哈尔滨工业大学分别参加了 1999 年巴西和 2000 年澳大利亚 FIRA 世界

杯机器人足球微型组的比赛。2001 年 FIRA 世界杯机器人足球比赛在中国举行。2002 年 5 月 25 - 28 日, FIRA 机器人足球世界杯赛在韩国汉城举行, 中国武汉化工学院队获得 5 人仿真组冠军, 哈尔滨工业大学队获得自主机器人 3 人组的冠军。东北大学队和哈尔滨工业大学队分别获得 5 人仿真组亚军和 11 人仿真组亚军。东北大学队还获得了微型机器人 5 人组和 11 人仿真组的第 3 名。此外, 中国台湾大学队夺得 11 人仿真组的冠军。中国科技大学研制的仿真机器人足球队参加了 2000 年第四届机器人足球世界杯赛 (RoboCup)。随后中国参赛队伍 2001 年扩展了清华大学和 2002 年的北京理工大学。

国内比赛从 1999 年开始举行, 1999 至 2001 年中国 RoboCup 仿真机器人足球赛举行了三届比赛。

我国开展机器人足球赛有力地推动了人工智能领域的研究与实验。智能机器人的研制早已列入“863”计划, 我国科学家已研制成功了水下自主机器人, 并且成功地进行了深海作业。机器人足球的研究目标之一是探索多个机器主体在不可预测的动态环境中如何进行通信联系, 如何进行紧密的配合, 这也正是当前人工智能领域的主要研究课题之一, 因此, 我国科学界和高等院校对于足球机器人的研究投入了大量的人力、物力和财力, 力争通过足球机器人的研究, 在国际人工智能研究领域取得新的突破。

1.2 机器人足球的强大发展动力

开展机器人足球赛, 最大的好处是能够将人工智能技术、计算机视觉等领域的研究成果与实践结合起来, 借助机器人足球赛对人工智能技术、计算机视觉技术的研究成果进行检验, 探索多个智能机器人在不可预测的动态环境中如何密切配合、协同作战, 使人工智能技术、计算机视觉技术更加成熟, 并加速它们的商品化、产业化进程。建造机器人进行足球比赛是很有挑战性的工作, 激发了大家极大的研究兴趣。到 1998 年 4 月, 共有 22 个国家 1000 多名研究人员在进行此方面的研究工作。目前, 我国已有很多高等院校实验室, 及一些科研机构都已开始了这一方面的研究工作。

人工智能专家北野宏明先生曾指出, 完成一台足球机器人离不开多方面的技术创新。首先, 它必须与现实世界建立一种互动性反应机制, 一边用摄像机、传感器观察世界, 一边即时做出判断, 而且非常接近人类感官功能, 属于一种可做出粗略判断的人工智能。比如, 若不能对错误信息及时修正就无法从事这项赛场上瞬息万变的足球运动。另一方面, 将来以人类为对手进行比赛时, 还要对它的安全性提出更高要求, 其表层材料应保证冲撞中不会给对方造成肢体伤害, 即便可以保证安全也不能仅凭力量以撂倒对方为胜。

北野宏明预计与我们人类同场竞技则可望于 2050 年实现, 因为从 1946 年世界上第一台 ENIAC 电脑问世, 到 1997 年美国 IBM 公司设计和研制的“深蓝”电脑在对弈中打败国际象棋冠军卡斯帕罗夫, 这段时期也不过是用了 50 年。目前人工智能研究尚处于初级阶段, 而机器人足球世界杯比赛正是朝着这个目标迈出的重要的一步。

机器人足球之所以获得如此迅速的发展, 就是因为它是人工智能领域的理想突破点, 又是吸引青年人科研兴趣与高新技术攻关的完美结合点, 机器人足球已成为高科技与体育、学

术与兴趣、科技与娱乐的完美结合。这便是它发展的活力所在。

参加比赛的机器人不仅要有对周围场景做出判断及控制自身运动的能力,还需要具有群体意识,要能够识别队友并相互配合。赛场上的情况瞬息万变,双方机器人都在不停地运动,因而机器人必须具有很强的跟踪、决策、反应能力和机动性。

足球机器人方案的设计,反映出开发者对人工智能学科前沿的深刻理解和敏锐洞察力。在足球机器人系统的开发过程中,不仅要遇到机器人学(robotics)、机电一体化、无线通信技术与计算机技术,还要涉及图像处理(image-processing)、传感器数据融合(sensor data fusion)、决策对策、进化算法、人工生命(artificial life)与智能控制等学科内容。

机器人视觉要在一秒内给出十几次甚至几十次球场实体识别的结果,这种实时性要求属于图像处理的前沿课题;机器人小车在有限的空间内(7.5cm^3)融合了移动机器人技术、无线通讯技术、微电机控制以及多传感器数据融合和智能协调控制等技术;至于如何将足球比赛的规则与策略形式化,以适应千变万化的赛场形势,这更要求在知识型系统的建模与决策算法上具有良好的适应性与实时性。

目前在人工智能领域的研究中常常遇到理论与实际脱节的问题,理论工作者时常抱怨没有从实际中来的问题,没有应用载体。这时足球机器人应运而生。它造价不高,五脏俱全,既不受企业条件的制约,又面对许多实际的问题,尤其对多智能体系统的研究提供了很好的试验载体。在人工智能领域,多智能体系统(Multi-agent System)是指包含 2 个以上的机器人以合作的方式完成给定任务的系统,近年来引起了许多学者的兴趣。而机器人足球融计算机视觉、模式识别、决策对策、无线数字通讯、自动控制与最优控制、智能体设计与电力传动等技术于一体。既是一个典型的智能机器人系统,又为研究发展多智能体系统、多机器人合作等理论提供了生动的研究模型,因此它刚一兴起就倍受关注。

机器人足球赛是由硬件或仿真机器人进行的足球赛,比赛规则与人类正式的足球赛相类似。硬件机器人足球队的研制涉及机器人学、计算机、自动控制、传感、无线通讯、图像处理、精密机械和仿生材料等众多学科的前沿研究与综合集成。仿真机器人足球赛在标准软件平台上进行,平台设计充分体现了控制、通讯、传感等方面的实际限制。仿真机器人足球队的研究重点是球队的高级功能,包括动态多主体系统中的合作、决策、实时规划和机器学习等当前人工智能的热点问题。因此,在国际人工智能领域,机器人足球被越来越多的人认为是未来 50 年研究的一个标准问题,正如国际象棋人机对抗赛被认为是过去 50 年研究的一个标准问题一样。机器人足球的竞赛目标是:到 2050 年,在"可比"的条件下,战胜人类的世界冠军队。

机器人足球赛有利于将人工智能理论研究与实践结合起来,检验新思想、新技术,促进相关科技发展。机器人足球赛所催生成熟的一系列高新技术,将为社会经济和文化的发展提供重要手段。机器人足球既是一种前沿研究的竞争和高技术对抗活动,又具有与足球类似的娱乐性、观赏性和刺激性。可以预料,这一活动将产生极大的市场需求和新的产业机会,带来不可估量的经济效益和社会效益。借助机器人足球赛,将人工智能技术的最新研究成果与实践结合起来,对人工智能技术的前沿研究成果进行检验,探索多个智能机器人在不可预测的动态环境中如何密切配合、协同作战,使人工智能技术更加成熟,加速人工智能技术的商品化、产业化进程。

第二章 足球机器人系统

2.1 足球机器人系统的组成

MiroSot 机器人足球比赛赛场的全视图如图 2-1 所示。比赛由两支球队参加，足球机器人比赛在 $150\text{cm} \times 130\text{cm}$ 场地上进行，双方各有三台小车参赛。由位于赛场上方约两米的地方的摄像头进行图像采集，捕获赛场图像信息并传送给主机，由主机对图像进行分析以辨识场上局势，并根据分析结果选择控制策略确定如何控制小车，再通过无线通讯将控制命令发送给各个小车，最后，由小车完成场地上的比赛任务。中间的下方是比赛场地，场中的机器人接收上位机发送过来的指令。一旦比赛开始，则双方的操作员就不能再进行干预了，双方足球机器按照一定的规则进行公平比赛，直到裁判员吹口哨暂停比赛。

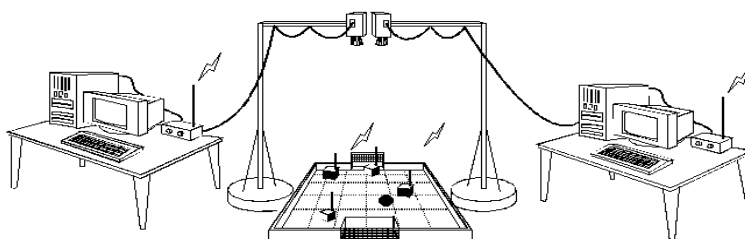


图 2-1 机器人足球赛场全视图

机器人足球系统由机器人子系统、视觉子系统、决策子系统和通信子系统四个部分组成，其相互联系如图 2-2 所示。决策子系统处理来自视觉的实时场景辨识数据，作出决策，通过通信子系统发出命令，由机器人小车完成一定的动作。

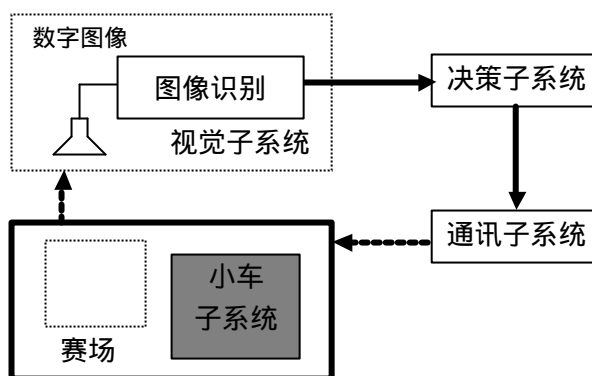


图 2-2 足球机器人系统结构图

(1) 机器人(小车)子系统

机器人(小车)子系统一般由动力驱动装置、无线通信接收单元、CPU 板和能源部分组成。由于受到机器人尺寸的限制,选择一个在功能、尺寸、功率消耗适合的 CPU 是很重要的,我们采用的是 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F240。机器人一般采用双电机双轮驱动的形式。常用伺服直流电动机或步进电动机,电机一般都带有光电编码器,以获得电机的速度反馈。通过减速箱减速和获得较高的力矩,并选择合适的电机控制芯片。能源系统必须存储足够的能量,以保证半场比赛的需要。

(2) 通讯子系统

根据机器人足球比赛的规则,需要采用无线通讯。主机的控制指令通过计算机的串行口送至通讯板,经过调制后发送出去。机器人的通讯接收器接收信号并解调,然后传送给车载微处理器。由于足球机器人的空间有限,通常采用单向通讯方式。为了提高通讯的质量和速度,要精心设计通讯电路及通讯协议。

(3) 视觉子系统

视觉子系统是整个系统的信号检测机构,由摄像头、图形采集卡等硬件设备和图象处理软件组成。比赛规则限定,每队有自己的颜色标签(蓝、黄之一),贴于机器人的顶部。每个机器人还有自己的色标。视觉系统要根据颜色捕获图象和计算位置,实时采集、处理比赛场景,并将辨识数据(双方小车及球的位姿)提供给决策系统进行分析决策使用。

(4) 决策子系统

决策子系统根据现场的情况,如当前得分、谁控制球、对手的水平等因素安排各自的策略,决定是进攻还是防守,再由策略库作出战术部署。策略应根据比赛规则和经验进行提取,并存在知识库中。知识库还应有一个学习智能体,用于不断丰富策略。各种智能算法如神经网络、模糊算法、遗传算法等也可以应用到构造策略库以及策略选择过程中。系统根据采取的对策,计划机器人的任务,转化为路径形式,然后发送出去,路径由一系列的命令组成。

2.2 微型足球机器人系统结构

微型机器人足球的赛场长 1.5 米,宽 1.3 米,比乒乓球台略小,场地画有中线、中圈和门区。每队由三个边长不超过 7.5 厘米的立方体形状的遥控小车(机器人)组成。它们的任务就是将橘红色的高尔夫球(足球)撞入对方的球门而力保本方不失球或少失球。比赛规则与现实的足球相似,也有点球、任意球和门球等。因机器人的电源 电池容量有限,每半场为 5 分钟,中间休息 10 分钟。下半场结束时若为平局,则有 3 分钟的延长期,也实行突然死亡法和点球大战。明显不同之处在于球场四周有围墙,所以没有界外球,在相持 10 秒后判争球。整个系统如图 2-1 所示。

机器人足球系统,在硬设备方面包括机器人小车、摄像装置(摄像头、视频卡)、计算机和无线发射装置(见图 2-1)。从功能上分,它包括机器人小车、视觉、决策和无线通讯四

个子系统。

机器人小车由车架、车轮、电机、减速机、测速码盘、驱动电源、单片机、DSP 控制电路与无线接收模块等构成。它可以按着主机发出的命令调整左、右轮转速，以保证按预定的轨迹运动。

视觉子系统是机器人的眼睛。它由悬挂在球场中圈上空两米的摄像头摄取连续单帧视频图像，由装在主机内的视频卡将图像数字化，送入主机内存，再由计算机中的软件对图像进行分析、理解，以获取比赛场上的信息，如机器人小车及小球的方位。比赛双方各自用不同的颜色表示队标(黄色或蓝色)，和机器人的队员标志，这样计算机就可以通过颜色分割，识别出全部机器人与球的坐标位置和方位角。这就是基于彩色识别的视觉系统，也就是进行模式识别。

计算机中的决策子系统根据视觉子系统提供的数据，利用人工智能技术，判断场上攻守态势，分配本方机器人攻守任务，决定各机器人的运动轨迹，然后形成针对各小车的左右轮转速的指令值。

无线通讯子系统通过计算机串行口取得相应的指令值，再由独立的发射装置与装在小车上的接收模块建立无线通讯联系，遥控场上各机器人的运动。目前仅实现了单向通信，控制指令由计算机单向发送至机器人小车，计算机端不能接收机器人小车的反馈。

在机器人足球比赛过程中，上述四个子系统以每秒二、三十次，甚至更高的速率连续运行，且各司其职，操作人员不能干预。比赛过程各子系统合作流程如图 2-2 所示。

2.3 轮式移动机器人的运动学方程

在过去的几十年里，机器人学已发展成为很成熟的一门学科，但研究工作主要集中在固定的工业机械手方面。针对运动机器人的研究较少。轮式移动机器人(Wheeled Mobile Robot)和自动导向小车 (Automated Guided Vehicle) 将是广泛的商业应用方面的第一类机器人，两种机器人的研究近年来也得到了广大学者的关注。

足球机器人小车采用的是固定轮子的双轮式结构，如图 2-3 所示。即点 P 在 Y 方向没有运动，假定轮子和地面之间没有滑动，沿直线作纯滚动运动，即每瞬时与地面接触点 C 的速度等于零。则点 P 的速度：

$$V = (r \times \omega) E_x \quad (2-1)$$

其中， E_x 为 x 轴的单位向量。

如图 2-4 有：

$$V_L = r\omega_L \quad V_R = r\omega_R \quad (2-2)$$

其中， r 为车轮半径，

ω_L 和 ω_R 分别为左右轮的角速度。

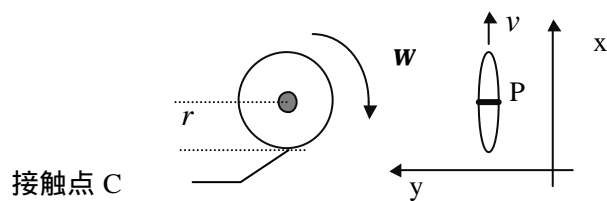


图 2-3 移动机器人动力学

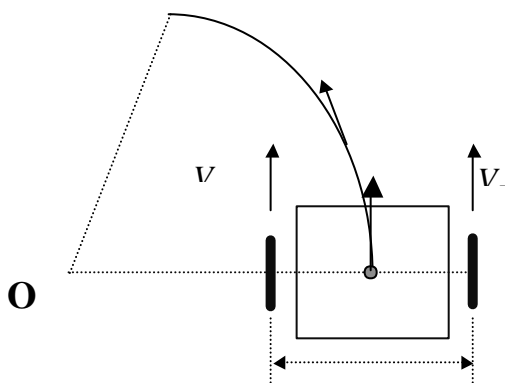


图 2-4 机器人小车转动示意图

机器人质心的瞬时线速度:

$$V_C = \frac{V_L + V_R}{2} \quad (2-3)$$

其中， V_L 和 V_R 分别是机器人小车的左右轮线速度。

对于一个转动构件，它任意一点的转动角速度相同，所以有：

$$V_R = V_L + wL \quad (2-4)$$

其中， L 是机器人小车的左右轮间距离。

机器人质心的瞬时角速度为:

$$w = \frac{V_R - V_L}{L} \quad (2-5)$$

因为属于 ICR(Instantaneous Center of Rotation)结构，由(2-3)、(2-5)式可得

$$\frac{V_R - V_L}{L} = \frac{V_L + V_R}{2R} \quad (2-6)$$

机器人小车的转动半径

$$R = \frac{L(V_R + V_L)}{2(V_R - V_L)} \quad (2-7)$$

即，当 $R \rightarrow \infty$ 时， $V_R = V_L$ ，小车作直线运动；

当 $R = 0$ 时， $V_R = -V_L$ ，小车围绕自己的中心原地旋转（即所谓回转半径为零）；

当 $V_R \neq V_L$ 时，小车围绕瞬心作圆周运动。

如图 2-5 所示，我们用坐标 (x, y) 和小车纵轴与 X 轴之间的夹角 q ，来描述机器人小车的位姿 P 。

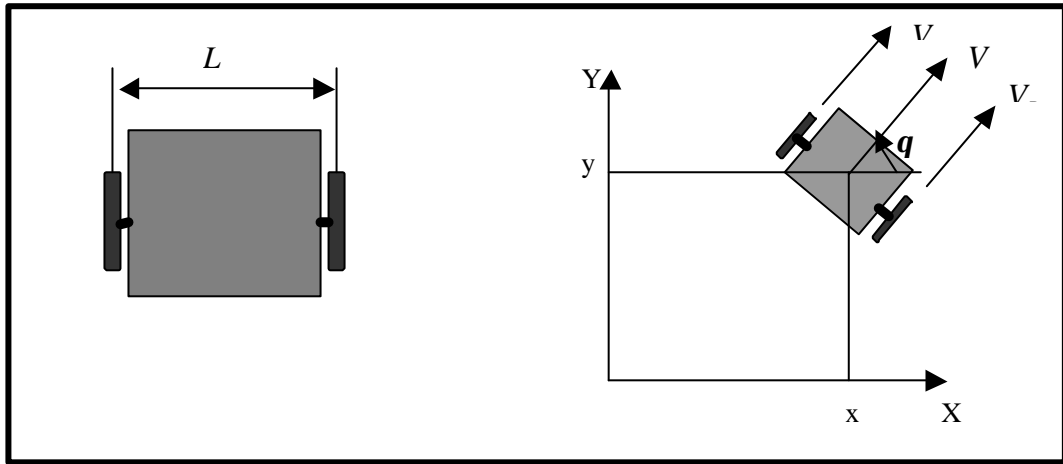


图 2-5 机器人小车的位姿

机器人小车的位姿可以表示为：

$$P = [x, y, q]^T \quad (2-8)$$

其中， (x, y) 为机器人的坐标， q 为机器人的面向。

我们可以得出机器人小车的运动学方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q & 0 \\ \sin q & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ w \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

其中， V 为小车质心的线速度， w 为其角速度。

这样，就可以通过 V 和 w 两个量来控制机器人的位姿，也可以进一步转化为对左右轮线速度 V_L 和 V_R 的控制。

第三章 足球机器人（小车）子系统

为了和整个机器人系统区别开来，我们称场上的“运动员”为机器人小车。“运动员”在其中的表现直接体现了整个足球机器人系统的好坏，显然机器人小车在系统中扮演着执行机构的角色，其性能的优劣对整个系统起着举足轻重的作用。机器人子系统通常采用两个电机驱动，大部分为轮式结构，也有的采用履带结构。概括的说，机器人小车应能准确地接收上位机指令，并根据指令要求迅速完成决策子系统的意图（带球，射门，拦截等战术动作）。

小车的典型结构如图 3-1 所示，小车主要由微控制器、电机和电机驱动、速度检测、通讯单元和电源五个部分构成。

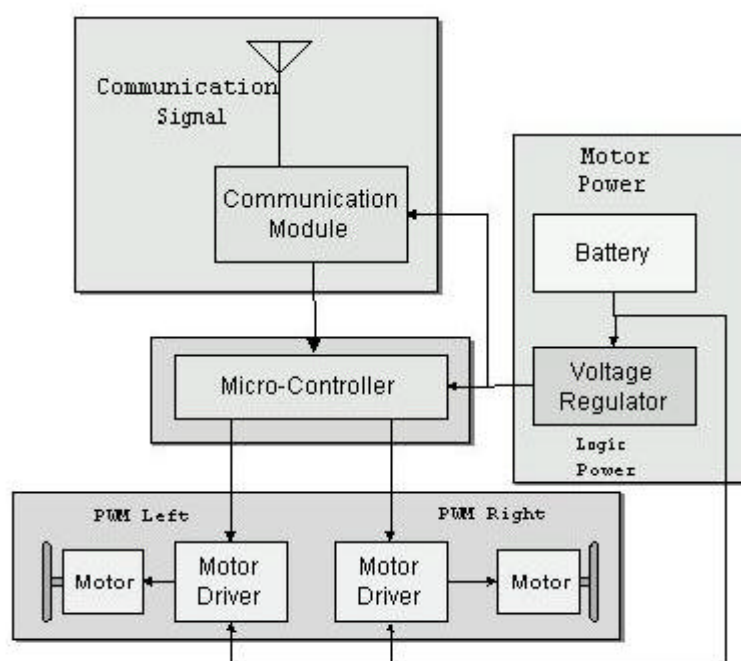


图 3-1 小车典型结构图

3.1 微控制器

要实现高智能，高性能的 CPU 是必需的。当前国内和国际的机器人队选用的 CPU 主要有以下 5 种：89C51 或 89C52、80C196KC、80C296SA、TMS320F240 和 H8/3062F。我们开发的机器人采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F240。

为了满足足球机器人比赛的要求，机器人小车的运动性能显得尤为重要。机器人小车应具备高度的机动性和灵活性，能够快速实现前进，后退，转角，停车等基本动作。采用 DSP 芯片—TMS320F240，正是利用了它快速的运算处理能力和丰富的专为电机控制的外设。TMS320F240 可以实时地完成许多移动机器人的复杂控制算法(如模糊控制)，另外，DSP 的

运算速度是单片机无法比拟的，即使在很复杂的控制中，采样周期也可以取得很小，控制效果更接近连续控制。

3.2 电机和电机驱动

MiroSot 系列的足球机器人小车大多采用双轮双电机驱动的方式。现在国际上绝大多数的机器人小车采用高性能的直流伺服电动机，但也有少数队采用步进电动机，如韩国的 Maskoro，它们的守门员和两个进攻队员采用不同的机械和电机结构。守门员用的是步进电动机--NK243，车体尺寸较大，而其它队员采用直流电动机，车体尺寸较小。与步进机相比，直流机具有更小的体积和更少的功率消耗。

我们采用的电机是瑞士 Minimotor 公司生产的 EM2224 永磁式直流电动机。电机部分由电机、光学编码器和齿轮箱三部分构成。它的部分参数如下：

- 额定电压： 6V
- 额定功率： 4.2W
- 空载转速： 8200rpm
- 转矩常量： 6.92mNm/A
- 空载电流： 29mA
- 机电时间常数：11ms
- 光学编码器分辨率：128ppr
- 减速比：8 : 1

脉冲宽度调制（PWM）主要应用在直流伺服控制系统中，随着电力电子技术的发展，PWM 技术也日趋成熟和完善。

PWM 驱动装置是利用晶体管的开关特性来调制固定电压的直流电源，按一个固定的频率来接通和断开，并根据需要改变一个周期内“接通”与“断开”时间的长短，通过改变伺服电动机电枢上的电压“占空比”来改变平均电压的大小，从而控制电动机的转速。

3.3 速度检测单元

整个足球机器人小车子系统是一个转速负反馈闭环调速系统，主要由速度 PID 控制器、PWM 产生环节、功率驱动和速度反馈四个部分组成，其结构如图 3-2 所示。

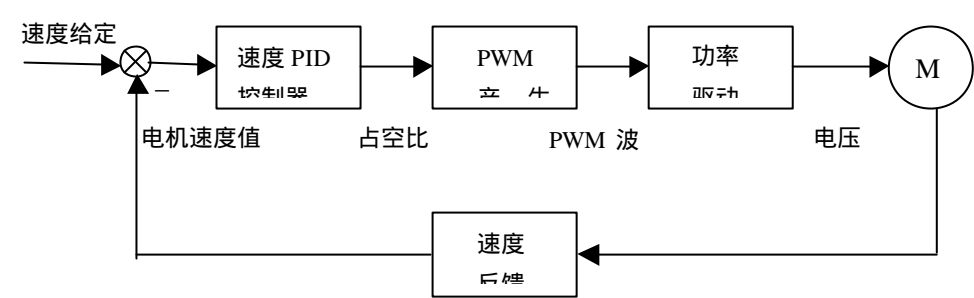


图 3-2 转速负反馈闭环调速系统

3.4 通讯单元

根据 MiroSot 比赛规则的要求，上位机与机器人小车之间必须采用无线通讯的形式。在我们的足球机器人系统中，上位机与机器人小车之间采用单向串行通讯的方式，主机的控制指令数据通过计算机的串行口送至单片机，单片机将接收的数据进行频率和格式的转换，再送给无线通讯模块，经过调制后发射出去，机器小车的车载通信模块接收并解调然后传送给车载微处理器（TMS320F240）。其结构如图 3-3 所示。

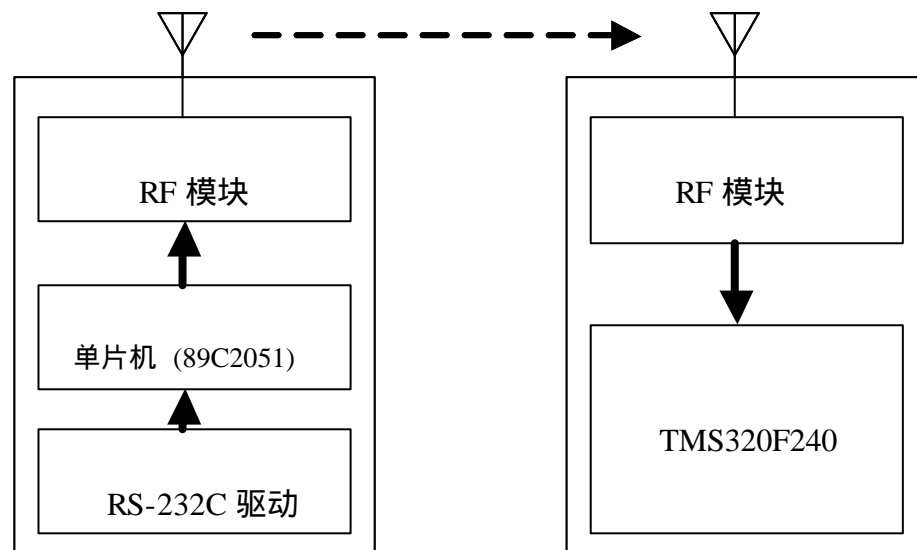


图 3-3 主机与机器人小车之间通讯示意图

RF（Radio Frequency）通讯模块采用的是专用的集成模块（Radiometrix），如图 3-4。这种模块集成度高，性能稳定，具有以下特点：

- （1）有 418MHz 和 433MHz 两种可选频率；
- （2）支持 5V CMOS 逻辑电平；
- （3）半双工通信最大的速度可达 40Kbit/s；
- （4）室内有效传输范围为 30 米；
- （5）易于与 RS-232 串口通讯接口；

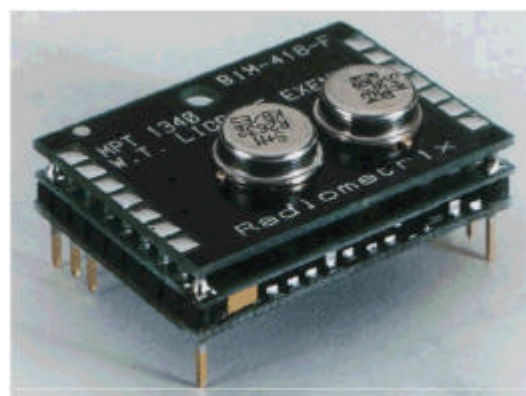


图 3-4 Radiometrix 的通讯

3.5 电源单元

机器人小车是无线移动小车，因此需要有车载电源。其能量应至少保证半场比赛的需要（5 分钟）。一般都是选择可充电的电池。采用的一块 8.4V 的 Ni-MH 电池组为两个直流电动机和车载电路板供电。通常电机和电路对电压的要求不同。车载电路采用 5V 电压供电，电流一般不大，几十个毫安，而电机的供电电压和电流则要求范围较宽，消耗的电流较大。

第四章 通讯子系统

足球机器人通讯系统结构如图 4-1。由于串行通讯占用时间较长，所以通过一块通讯控制卡来管理主机与发射机之间的串行通讯。这样每次辨识决策结束后，将命令并行写入通讯控制卡，再由控制卡按照设定的通讯速率串行输出，送至无线发射机进行信号调制放大，明显提高了系统效率。以下以中南大学足球机器人系统为例说明通讯子系统的构成。

根据比赛规则，需采用无线通讯。主机的控制指令数据通过计算机的串行口送至无线通讯模块，经过调制后发射出去，机器人的通信部件接收并解调然后传送给车载微处理器。无线数字通讯一般采用商用的 R/F 模块。

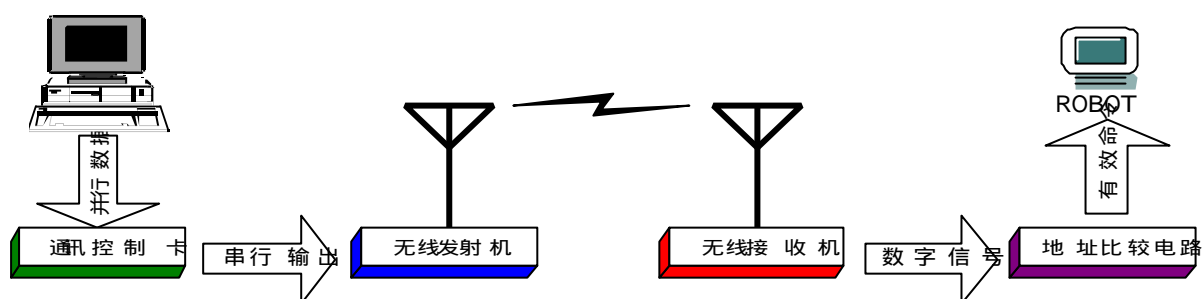


图 4-1 足球机器人通讯子系统结构图

4.1 发射部分

就象上级对下级发出命令一样，主机发出指令给机器人小车，其间要经过一个通信发射板。通信发射板采用 89C2051 的单片机，用单向无线串行通讯的方式向机器人发射指令。通信发射板则与主机的串口相连。通讯板上的 RF 通讯模块与机器人小车车载 RF 通信模块之间数据传送是采用无线通讯的形式。

实际上，一片 89C2051 单片机作为中间转发器件，它接收数据时，与主机的通信波特率为 19200bps 或 38400bps，而发送数据时，又将波特率改为 9600bps；为了进一步提高主机的串口通信速度，89C2051 与主机的通信格式和它与 DSP 之间的通信格式是不一样，每个控制周期，它从主机共接 8 个字节，而数据形式转换后，以 9 个字节的形式发送出去。

4.2 车载接收部分

车载通信模块接收数据，并解调后传送给 TMS320F240 的串行通信接口（SCI），从而完成了主机与机器人小车之间的数据通讯。

4.3 通讯协议

1. 主机与通信发射板之间的通讯协议

主机串行发射的发射频率是 19200bps,共 8 位数据,无奇偶校验。每个控制周期发射 8 个字节,第 1 字节为帧头标志,固定为 0XAA,第 2、3 字节为小车 1 的左右轮速度值;第 4、5 字节为小车 2 的左右轮速度值;第 6、7 字节为小车 3 的左右轮速度值;第 8 字节为 2-7 字节的和,累加时只取低 8 位,作为该数据包的校验字节。

2. 通信发射板与小车接收部分之间的通讯协议

为了实现一对多的通讯,机器人小车的通讯采用广播方式,所有机器人采用统一的通讯频率,而发给不同机器人的命令则根据各自的标识位加以区分。每个机器人小车接收到的控制命令字包括三个字节,第一字节是小车标号,第二字节是该小车左轮速度,第三字节是该小车右轮速度。总的指令为 9 个字节,格式如表 4-1 所示:

表 4-1 机器人小车的通信数据格式

字节 1	字节 2	字节 3	...	字节 7	字节 8	字节 9
1 号标识	1 号左轮速度	1 号右轮速度	...	3 号标识	3 号左轮速度	3 号右轮速度

每个机器人都能够接收到上位机发送的任一条指令,如果机器人检测出信号的某一个字节与自己的标识相符,则随后的命令被判断为有效的,即是要执行的命令。

小车的标识号分别为 0XA9、0XAA 和 0XAB,其左右轮的速度范围为 $[-2.2\text{m/s}, 2.2\text{m/s}]$,将其分为 127 个速度级别,用-63 到 63 之间的 127 个整数(实际上是用十六进制数)来表示,速度值为正时取原码,为负时取补码。这样的处理方法即保证了小车的速度多级分档,又确保了速度命令码与小车的标识不会出现重码。

第五章 视觉子系统

视觉子系统是足球机器人的“眼睛”。人在行走时，要靠眼睛获得路况信息。当前处在哪儿？现在在往什么方向走？前面是否有障碍？又如，人们在射击时，要用眼睛瞄准目标等等。眼睛将上述信息传递给大脑，由大脑作出决定来支配手和脚的动作。可见，在人完成某个动作的时候，眼睛起到了收集信息的作用。对人来说，为大脑提供信息的还有其他的感觉器官，如，听觉，触觉，嗅觉等。

就基于视觉的足球机器人来说，视觉子系统是其“大脑”——决策子系统的唯一信息来源。它的主要任务是实时采集比赛场地的图像，然后自动处理、分析和理解图像，因此而获得场上运动物体(比赛双方的机器人小车，小球)的位置、运动方向、速度等信息，并将这些信息提供给决策子系统进行分析、决策使用。视觉子系统作为整个足球机器人系统的检测机构，是它的“眼睛”。

足球机器人视觉子系统所处理的是比赛场地的彩色图像，球场背景为黑色，球门等标志线条为白色，“足球”为橘红色小球，比赛双方的小车均用不同的颜色(每种颜色全场唯一)进行标识。视觉子系统主要是通过分析这样的彩色图像来向决策子系统提供信息的。彩色图像是由很多彩色像素组成，像素是图像中的可区分的最小单元。一帧分辨率为 640×480 的彩色图像包含 300KB(千字节)个像素。每个彩色像素是用三个八位二进制数(三个字节)表示，分别对应像素红、绿、蓝三基色的亮度。一般的图像采集设备可以达到每秒 25(或 30)帧，即每秒 22(或 27)兆字节信息。要想圆满完成各项任务，视觉子系统在高精度要求基础上，还要有真正实时性。

视觉子系统可以有几种不同的实现方式。有纯软件方式、软硬件综合方式和纯硬件方式。采用纯软件方式时，图像采集卡只完成图像的数字化转换。这种方式下，图像采集卡的结构简单，通用性强，成本低，但由于主机要完成大量的数字图像信息的处理，工作量很大，实时处理的速度难以保证。采用软硬件综合方式时，图像采集卡完成图像的数字化转换、图像压缩等功能。这种方式下，图像的通用性强，成本低，主机的处理的图像信息量可以随图像的压缩比的增大而减少，在图像处理的精度范围内，提高图像的压缩比可以提高主机的处理速度。而且这种方式的开发周期相对较短。采用纯硬件方式时，图像采集卡完成图像的数字化转换、压缩、分析和处理的功能，向主机传送图像处理后的结果。由于大量的图像处理、分析动作都由图像采集卡来完成，减轻了主机的负担，是提高系统的实时处理速度的有利手段。目前，大多采用 DSP(Digital Signal Processing)技术来实现这种方式，图像采集卡上有专用的数字信号处理芯片。采用这种方式，图像采集卡的结构和功能都是根据不同系统的具体要求来设计的，通用性不强，设计的周期较长，设计的成本较高。

无论采用哪种方式，足球机器人视觉子系统一般具有如下功能模块：像素分类、目标识别、特征提取和目标跟踪。

像素分类也可以说是图像二值化，是将彩色图像中各像素区分成不同对象的子类。有几种类型的分类方法：阈值法、统计学方法和聚类法等。经过像素分类处理后彩色图像变二值图像(感兴趣的目标点为 1 或 255，背景点为 0，也可根据算法实现的需要设置成其它值，这一情形可称之为多重二值化)。

目标识别可认为是真正意义上的图像分割，通过连通性分析，在二值图中，分离出中各个独立的目标区域。

特征提取，此模块是计算独立目标区域的特征量，如矩心、目标周长、面积和方向等，为决策子系统提供信息。

比赛时，视觉子系统连续摄取场地一帧一帧的彩色图像，及时的处理各帧，使机器人小车能进行连续、连贯的比赛。一种实现方法是对所采集每一帧进行全帧识别处理(重复执行像素分类、目标识别和特征提取等动作)；另一实现方法是利用上帧所识别出来的目标信息，根据它的速度及运动方向，对它在下帧中的大致位置进行预测估计，从而只需在一帧图像的局部区域进行搜索和识别处理，这一方法便是实际的目标跟踪。二者各有利弊。第一种方法中当前识别动作及结果不依赖于上次的识别结果，即使在某一次识别中丢失目标，也不影响下一次的识别，具有很强的鲁棒性，但由于每次处理的数据量大，较难达到系统的实时性要求，或很难提供时间进行一些其它处理。第二种方法大大的减少了处理的数据量，从而很容易实现实时性要求，也可以提供较多的时间进行其它处理。但由于下一次的识别依赖于当前的识别结果，如当前识别过程丢失目标，将彻底影响下一次识别的实现，因而鲁棒性较差一点。

基于彩色识别的视觉子系统的实现原理(工作过程)，可用图 5-1 演示说明。

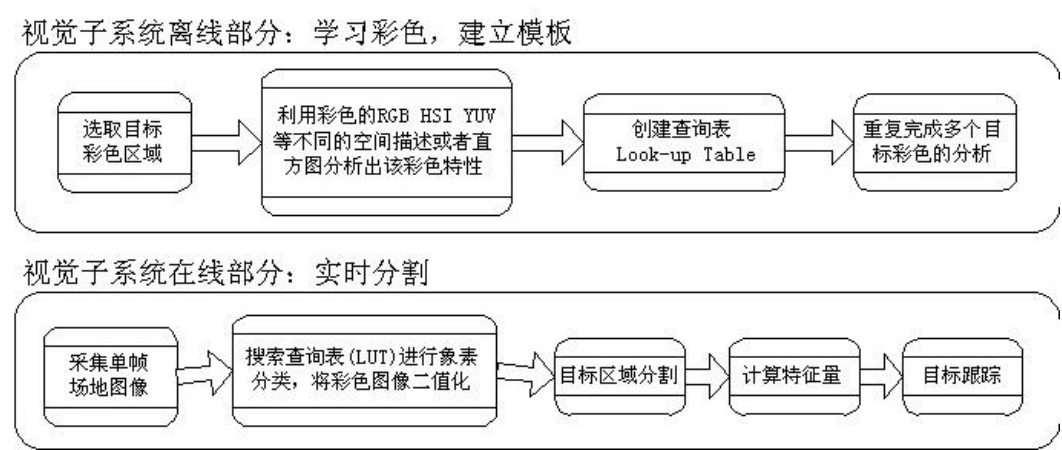


图 5-1 足球机器人视觉子系统原理图

整个足球机器人视觉子系统包含有两大模块 :离线的彩色分析(或称为系统初始化阶段)和在在线的实时分割(跟踪阶段)。

离线彩色分析最终结果是获得一个或多个查询表(Look-up Table)，也可说是模板或模型(Model)，它可以是基于统计学特征的数据，也可以是根据相应彩色空间使用的阈值，或者是基于直方图的分布规律。总之，为了加速处理，很少使用传统意义上的模板。

5.1 彩色图像处理及模式识别

5.1.1 颜色与彩色图像

颜色是一种源自于发光体光谱特性的物理现象。当我们观察我们的周边环境时，我们能根据物体是什么颜色来区分它们。实际上，人不仅仅能区分颜色(或色调)，也能区分颜色的纯度(或饱和度)和亮度。然而，颜色是人们观察的结果，现实世界中它并不存在。

人的视网膜有三种类型的颜色感光锥体细胞，每一种类型的细胞都只对具有相应光谱反应曲线的光敏感。在正常人的眼睛里，颜色被感觉成长、中、短三种波长近似线性的一种复合体，这与现在使用的标准视频摄像系统中三基色原理(红、绿、蓝)大致相类似。因而，人对色调，饱和度，亮度的感觉是被源自于三种类型的锥体细胞混合反应所决定的。这一理论被称作颜色的三色度学理论。

然而现在，对颜色的感知必须人为地被创建或转换成为计算机可接受识别的数字形式。

首先，用摄像机取代人眼。传感器取代视网膜反应光的作用，三种不同的设备代替了锥体细胞，每一种设备对某一种相应的基色(通过颜色的三色度理论导出的一种方法)具有不同的光谱反应。然后，那些对光作出反应的设备，将电磁能转换为电能，传感器产生的电信号接着被采样(sample)与量化(quantize)，而产生一个对三维真实世界情景的二维数字描述，这一过程可被解释为图像的数字化过程，它是一个模拟量到数字量的转换过程(ADC：analog to digital conversion)，在这个过程里，真实环境的模拟信号(定义在连续空间域和时域)，被转换成数字信号(仅定义在离散的空间域和时域)。对真实情景的二维数字描述被称为数字彩色图像或数字彩色视频图像。连续的、恒定速率的图像流被称为数字彩色视频。

对于颜色，学术界有三种理解方法，分别是统计学方法、物理方法和知觉方法。

在统计学方法中，颜色被看作一个统计量。它被分析成为一个随机变量，与产生颜色与颜色变化的物理规律没有一致性。很明显，一种可能的进行图像分析的技术是利用目标颜色的先验知识。这是最早被采用的一种技术，被称为光谱信号分析(spectral signature analysis)。它将彩色图像中的像素值与预先计算出的目标彩色特征的标准值进行比较，将与目标彩色特征值最接近的像素归类为该目标，实现像素分类。与之相关的还有一些其它技术如，聚类(clustering)、区域分割(region splitting)、区域合并(region growing)与边界检测(edge detection)等。

在物理学方法中，当颜色被认为是一个物理量时，关于颜色是如何形成的知识就主要被用于理解彩色图像。最基本的方法是分类图像区域成阴影区、高亮度区等。我们可以使用一些等式对彩色图像进行定量分析取代这些定性的分析方法，这些等式表示实景中一个点的反射光的光谱能量分布，它依赖于实景中该点的光照及其表面反射特性。由于图像几何特征的变化，对同一个目标上的不同点，其反射特征函数可以说截然不同。

知觉方法可解释成为人类视觉中的知觉变量。在这种方法中，大部分研究主要集中在模仿人的视觉系统，以期使这种方法能适用于计算机视觉。然而，由于人对颜色感知的精确机制仍然未知，研究者在计算机视觉中仅能尝试达到相类似效果的方法。

5.1.2 彩色不变量(color constancy)与颜色空间(color spaces)

彩色不变量是基于彩色的图像分割领域中最具挑战的工作。光照、阴影区、高亮度区、交叉反射、摄像机的内在参数以及各类硬件本身特性等多种因素的变化，都会影响颜色信息的感知。

在日常生活中，我们连续地经历着不同的环境，有很多物体能给我们的活动提供光照，如太阳光、电气发光体(灯泡)等。这些对人的视觉系统来说，不存在不良影响，它可进行自我调整而适应当前的主要光照，以确保人对同一物体感知出基本相同的颜色信息。然而，对于计算机视觉系统，这一现象引发了严重的问题。当然，还存在一些其它的因素。为使系统对诸多变化的条件具有鲁棒自适应能力，所有这些元素都应得以解决，这就促使了彩色不变量方法的提出。使用一个合适的颜色空间可以使彩色不变量的运用更加容易。使用能将颜色中亮度信息分离至不同分量的颜色空间，可以解决光照变化所引起的一些问题。

在数字图像系统中颜色有多种不同的表示方法，这些方法称为颜色模型或颜色空间。一个颜色空间是一种解释特殊场景中颜色特性或状态的方法，它主要是在颜色域中对颜色作一个简易的说明，或者可说是所有可见颜色的子集。通常，对一个彩色成像系统，选择一个合适颜色模型是非常关键的一方面。

在很多情况下，成像系统所使用的颜色空间并不很适合于进行图像处理，因而从一种空间描述转换成另一空间描述就很有必要了。但一般情况下，我们宁愿避免这种计算复杂且耗时的操作。现在我们仅介绍一些在实时彩色图像分割中可能需要使用的颜色空间转换。

(1) RGB空间

RGB(Red、Green、Blue)空间可能是我们了解最多的颜色空间，它是一个面向硬件(hardware-oriented)的空间，使用在很多取图设备和处理应用中(如CCD摄像机、图像显示)。

RGB颜色空间采用笛卡尔(Cartesian)坐标系。可以将RGB空间看成单位立方体，在原点(0, 0, 0)处，三个分量均为最小值状态，表示为黑色(black)。在立方体的对角顶点(1, 1, 1)处三分量为最大值状态，相应表示为白色。处于单位立方体主对角线上的三分量被称为灰度对角线(gray diagonal)，对应于每一个像素的亮度分量。该图沿着灰度对角线这一视点显示立方体，说明了不同的颜色在立方体中所处的位置。其中红、绿、蓝相应位于立方体在三主轴的端点处，而其它颜色则是它们的线性组合。

尽管面向硬件的RGB颜色空间对实时应用非常有吸引力，但从彩色不变量角度来说它有几个缺点。因为在三个颜色分量中都包含一定波长光源的亮度信息，光源亮度的变化同时影响三基色分量。因此，它不是最适宜应用于图像分割。

但RGB颜色空间也已用于图像分析应用中。如在RoboCup系统的视觉子系统中。然而，亮度依赖性通常要求对RGB实现剔除亮度信息的归一化(normalization)处理。

YUV颜色空间面向硬件的颜色空间用于对PAL和NTSC制式的复合视频信号进行编码。Y分量表示像素的亮度分量，U与V是不同的颜色分量。实际上，由于很多摄像设备都支持YUV颜色空间，而且其亮度信息是分离状态，因此它非常适用于实时图像分割应用。

已有很多实际实时彩色图像分析系统使用该颜色空间。例如，Wen等人在他们实现的有名的Pfinder系统(实时人体跟踪)中使用该颜色空间。然后，也有人提出，在减少对光源亮度分量的依赖性方面，归一化RG空间优于YUV颜色空间。在RoboCup应用中，Bandlow等使用YUV颜色空间取得了比较好的效果。

(2) HSI颜色空间

HIS(Hue, Saturation, Intensity)及与其相关的如HSV(Hue, Saturation, Value)、HDI(Hue, Distance, Intensity)等广泛地应用于实时的彩色视觉系统。HIS颜色空间使用非常近似于人对

彩色感知的方法来定义彩色，它对我们来讲是一种很直观的方法。色调(Hue)分量表示什么颜色(如红色、绿、蓝等)，饱和度(Saturation)分量表示颜色的浓淡程度(如深黄色)，亮度(Intensity)分量描述颜色的亮暗程序(如亮蓝色、暗蓝色)。图5-2显示HIS颜色空间。对于彩色 x ，色调是红色与彩色 x 和黑点连线间的夹角。饱和度是图5-2中右边部分的三角形边所表示的纯色与彩色 x 的比值。亮度是从原点开始沿着灰度对角线(Gray diagonal)的距离，它的值归一化于 $[0, 1]$ 范围内。应注意到一个现象：当饱和度很低时，色调变得不稳定。同样很高或很低的亮度值会导致色调及饱和度不稳定。

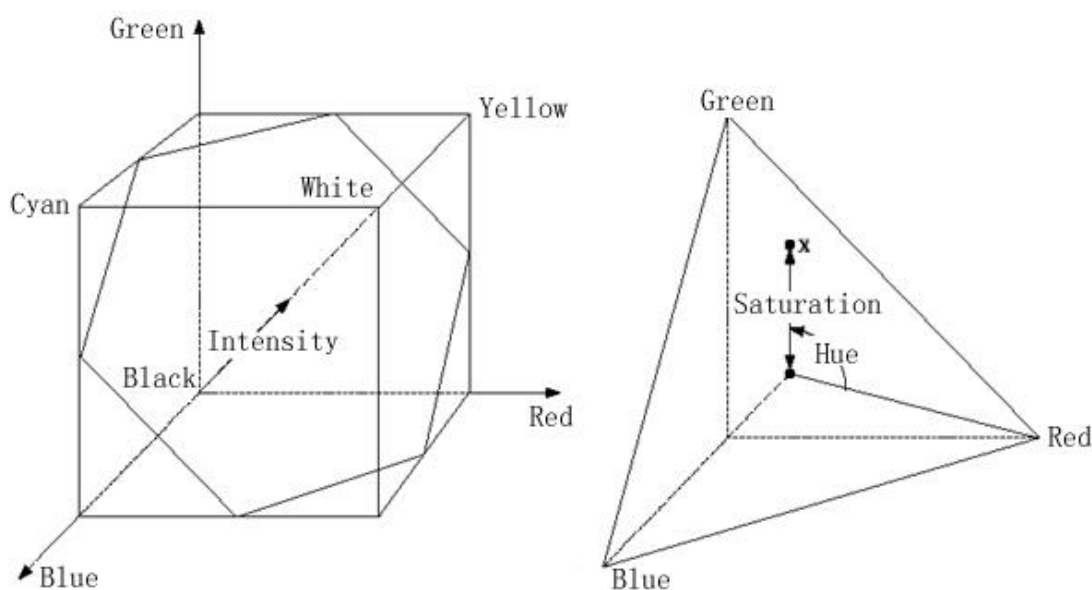


图 5-2 HIS 颜色空间示意图

因为HIS颜色空间中亮度分量与色度分量相互分离，在彩色图像分割应用中具有较大优势。而且其中的纯色(色调)与饱和度也是相互分离状态。理论上，在一些应用中可仅使用色调分量分割图像，这样，或许能开发出可由人指导的图像分割系统，如给机器人一个描述性的指令“把桌上的红茶杯递给我”；另外使用一个分量值进行分分割，也更很容易实现对不同光源的自适应性。在实时应用中，这种颜色空间有一个严重的问题：很少有摄像硬件设备支持这种形式，因需要从其它一些空间进行转换。

(3) NCC颜色空间

NCC(Normalized Color Components)颜色空间是一种最简单的消除象素颜色中亮度分量的方法。

彩色不变量在基于彩色的图像分割中占有重要地位。彩色成像系统中大量影响彩色感知效果的问题应引起注意。第一个影响颜色信息的主要因素是摄像机，在成像系统中它本身是一个关键的部件。现在的工业用彩色CCD摄像机能产生高质量的数字图像。另外与摄像机有关的问题是摄像机参数设置。

另一个主要因素是光源。可联合使用摄像机参数设置和上文所描述的颜色空间处理好亮度变化的问题。另外，不同的发光体有不同的色温，也能颜色感知效果不同。只有使用自适

应的分割方法,或者利用对变化光照具有稳定性的颜色空间,或者选择一种合适的颜色空间,才能较好地解决这个问题。。

另外,物体的形状,以及场景中其它的物体,也可能促使颜色感知误差,光照产生高亮度区和阴影区,其它物体反射过来的彩色光也可引起颜色偏移。在实时系统中,高亮度区可使用二色反射模型加以考虑。

5.1.3 彩色图像预处理

目前已有很对灰度图像进行平滑、锐化等滤波的算法,可以将它们变换至可用于彩色图像处理中,通常有几种方法,其一是将彩色转换成灰度图像后,直接使用,但在有些必须利用颜色信息的图像处理应用中,这可能会导致一些问题。其二是分别用灰度图处理算法对颜色空间中的每个分量进行处理,这种方法的问题是加大了处理的计算量,同时处理效果也不理想。针对彩色图像,必须寻求不同于灰度图像的一些算法。一般来说,这样的彩色图像平滑滤波算法有中值滤波法、对称最近邻域滤波法、高斯滤波法以及彩色增强法。

5.1.4 目标分割

分割是将图像细分成相互独立的组成部分或目标,是自动图像分析中最重要的环节之一,它从图像中提取目标,为后续处理如目标识别、目标跟踪奠基。

(1) 像素分类(pixel labeling)

目标分割的第一步是像素分类。已有很多不同的方法,利用颜色标准将图像中像素归类或分类成一些离散的子类。第一种方法在特征空间(feature space)或颜色空间中实现,包括阈值法(thresholding)、统计概率法(probabilistic methods)和聚类法(clustering)。另一种方法在图像域内,例如使用不同图像部分的相似性作为标准进行图像分割。下面简略介绍阈值法。

阈值法是一种最直观的彩色分割方法。当目标颜色是可知的,或能被预先测量(如检测目标颜色的直方图)时,可使用阈值作为目标颜色的一个限定范围。可以采样学习目标物体颜色,计算出每一个颜色分量的均值与方差来自动设定阈值,也可以通过自动分析彩色直方图来设定阈值。分割的结果是产生一类二值图像,其中被归类为感兴趣目标像素点的值被设置成非 0(或 1,或者可使用其它的一些标志值),背景像素点为 0。一般有两彩色阈值方法:颜色空间阈值法和线性颜色阈值法。

(2) 目标分类(Object labeling)

当使用像素颜色作为标准将图像分割成功后,下一步通常是将图像中不同区域分类成独立的目标对象。像素分类是实际的目标分割的初始步骤,很大程度上决定着系统的可靠性。有几种有效的方法完成这一动作。如果目标颜色是已知且比较统一,则阈值技术是比较好的选择。对于多颜色目标,基于模型的方法将更有效。当目标颜色不可预知时,则可选择聚类法。

由于没有通用有效的方法,基于视觉感知的移动机器人不能只使用单独的一种分割方法,在同一视觉系统中,对不同的分割目的使用不同的分割方法,则可以获得一个通用且鲁棒的视觉系统。然而视觉系统的实时性要求,也是很具挑战性的任务,特别当多个分割任务同时进行,实时性要求则更难达到。经过严格优化的单个分割方法运行于普通的计算机平

台可以达到实时，但随着任务的增加，相应的处理时间会增加。

5.1.5 目标跟踪

视觉系统(特别在视觉跟踪)中，在连续的图像中计算出目标的位置后，跟踪目标下一个待处理的问题，也是视觉系统的最后一个阶段。跟踪的基本思想是观察目标在不同时刻(一个瞬间到另一个瞬间)的状态，这主要意味着测量图像中一些状态变量，和估计目标未来时刻的状态。预先能从数学角度了解目标的一些信息，无疑对随后进行的目标跟踪有很大的帮助。因此，我们有必要在分割出来的图像中提取每个目标的数学特性。

颜色是可将目标从其所在环境中提取出来的一个重要的信号和特征，但有时其作用有限。比如，一帧场景图像中有多个颜色比较接近的目标，这些情况下，需要另外一些特征，用来彻底区分目标，如目标的面积、周长、方向、空间矩等。跟踪主要针对目标在图像坐标系中的位置，因此图像中每个目标的位置也是一个重要的特征。在实际中，目标位置可由目标的中心所确定。

目前已有很多实现跟踪的方法，一种最通用的方法是基于预测系统行为的状态模型，通常这意味着必须根据目标行为的先验知识计算目标相关的状态量，然后预测其在下一个时刻的状态。通过比较测量了下一个时刻测量状态与预测状态，则可以获得目标的正确状态信息。实现目标跟踪的一种方法是使用如卡尔曼滤波(Kalman filtering)的预测法，另一种是使用统计学方法。

足球机器人的视觉子系统要求能同时识别与跟踪多个彩色目标，因此它要求有一个精确的、稳定的识别与跟踪算法，卡尔曼滤波算法与均值移位算法都是可行的方法。

5.2 系统要求

1. 同时识别跟踪多个移动目标

足球机器人中，需同时识别及跟踪的对象有小球、我方小车、对方小车，视觉子系统同时识别跟踪多个移动目标，是其最基本的要求之一。

2. 目标分割、识别的精度高

为加速识别及跟踪速度，视觉中所处理的视频图像分辨率为 320×240 像素，机器小车顶部面积仅为 $7.5 \times 7.5 \text{cm}^2$ ，而且设计用来标识小车的彩色块则更小，在被获取的视频图像中，小车顶部面积大约有 15×15 像素。这样图像中较小的识别误差，在实际中则造成了比较大的偏差，直接影响决策子系统。因此，视觉子系统要求有很高的精度。其中影响精度的一个因素是摄像头所引起的几何畸变，因此也要求系统能进行相应的几何校正。还有就是光亮度的变化也很大程度上影响了识别的精度。

3. 实时性

机器小车在比赛过程中的最大速度为 2m/s 左右，如果视觉系统达不到实时的要求，则系统所处理的前后两帧图像数据差异太大，不仅影响识别跟踪的顺利完成，而且也使小车表现为反应迟钝(其结果可想而知)，所以视觉系统的实时性能越好，则系统反应越快。

4. 鲁棒性与自适性

机器人足球比赛全部在室内进行，虽然光照设备比较统一，但由于多方面的原因，致使在一场比赛过程中场地的光亮度也会发生变化(如电压不稳定、所使用灯管老化等因素)，更甚的是在同一帧视频图像中，场地的不同区域光亮度都可能不一致，有高亮度区域，也有阴暗区域(如围观人群使场地局部变暗、或其它物体反射至场地中的光使场地局部变亮)。光照条件的变化及光亮度不均匀将会降低系统识别的精度，甚至会导致目标识别失败。因此，很有必要研究运用对光亮度变化不敏感的彩色识别算法，以及能自适应于这些变化的算法。

5.3 视频图像获取模块

视频图像获取模块提供一个标准的捕获图像的接口，它允许视频卡设备通过DMA内存访问方式将一帧图像数据写入内存中。有几种可能的捕获方法，可选择其中的异步连续捕获模式，在这种模式中，视频卡以最大速率从摄像头中读取帧数据，对于PAL制式的摄像头为25Hz，不需要在其它进行图像处理的程序与捕获视频的操作之间实现同步，这样程序可以全速率(25Hz)进行工作。在支持这种模式的设备中，如果其它程序以高于摄像头所提供的全速率进行处理的话，那么一帧数据就可以被处理两次或可以进行其它更的操作(这将有助于提高识别精度)。相应的，如果图像处理程序工作速率低于摄像头的全速率话，可能会造成跳跃性的处理帧数据，从而影响识别的精度。另一种捕获模式为单帧捕获模式，但它的捕获速度太慢，而不能应用于实时系统中。

视频卡将捕获的视频图像写入内存时，使用四个字节(32位)表示一个象素点的RGB值，如图5-3所示，四字节由高至低分别表示象素点颜色的B G R值，最低字节保留未用。

01000001011001010101000100000000

图 5-3 帧数据中象素点字节示意图

视频卡将捕获的视频图像写入内存时，有一点与 Windows 中实际的位图数据的存储格式不同，位图中起始处的数据是图像中最后一行的数据信息，而内存中的视频图像与之相反。

从程序设计角度考虑，可以通过 Windows 回调函数的机制实现视频卡的异步连续捕获模式，这样可以提供更多地时间进行其它操作。

5.4 系统体系结构

图 5-1 展示了视觉系统的体系结构，其工作流程如下：

- (1) 系统始化。采样的目标颜色，进行滤波处理(根据实际情况进行交互选择)，经过学习后获取相关的颜色阈值，并创建查询表。或者建立统计模型，近似地表示象素颜色值的统计分布。
- (2) 比赛进行阶段。根据(1)中所得的阈值或模型，对连续捕获的单帧图像进行象素分类操作，形成多重二值图。
- (3) 对二值图进行形态学中的开或闭运算(可选择进行)。
- (4) 对二值图中进行连通性分析，或区域分割等操作，并因此而计算出矩心(中心)。

(5) 根据当前识别出的目标状态(中心、运动方向和运动速度)，对下一次目标的搜索区域进行预测估计。

重复(2)至(5)，直至比赛结束。

第六章决策子系统

在足球机器人系统中决策子系统的任务就是根据当前球场上的比赛形势，做出布署，给队员发出指令。它是整个机器人系统的核心，相当于整个系统闭环中的控制器。

决策子系统是决定整个系统性能的关键，它相当于机器人的大脑，因此它应具有一定智能，也就是学习和推理能力，并且要满足准确性、快速性、扩展性等的要求。

决策最终是要控制机器人，所以如何使决策子系统和机器人子系统相互配合是首先要解决的问题，要达到机器人能完全贯彻决策的意图，保证机器人运动的准确和快速。

其次，既然决策系统是个智能体系统，那么，它应该具有智能的特征，包括对环境的感知和与环境的互作用，能主动确立目标等。

介绍两种决策方法。第一种方法是三层决策模型。它由韩国学者提出并被国内外很多研究小组所采用，论文介绍了在保持三层决策模型的三层框架不变的基础上，对各层决策所做的大量改进。第二种方法是双层决策模型。它是中南大学课题组在分析了机器人运动特点的基础上提出的。在这种模型中，采用了基于行为的机器人控制方式，使机器人成为具有一定自决能力的个体。这实际上是借鉴了多智能体系统的部分特点，提高了决策系统的灵活性。

着重介绍第一种决策方法。

决策子系统的载体是一台计算机，其决策功能由计算机内运行的决策程序实现。以视觉系统返回的图象数据为输入，经分析后，从策略库中调出合适的决策方式，并将其参数化，形成三个机器人的运动指令。然后，将指令发送给通讯子系统，并要求通讯子系统向机器人发送指令。

决策子系统设计应考虑的问题：

(1) 足球机器人比赛环境复杂，决策子系统面对的是一个复杂、动态、难以准确得到模型的环境。决策子系统应能适应复杂的环境，为进一步的决策提供良好的背景数据基础。

(2) 决策的目的就是取得比赛的胜利，它应该能适应并击败对方。因此，策略库应该是开放性的，决策子系统应具有一定的自学习的能力。

(3) 决策必须满足实时性要求，能在较短的时间内完成决策过程。决策时间越短，实时性越好。

由此可见，决策子系统应满足适应性好、具有自学习能力、实时性好等几方面的要求。

基于三层模型的决策子系统的决策模型属于分层递阶控制方法。从根本上来说，是一种集中控制方式，即用一个全局控制器，对

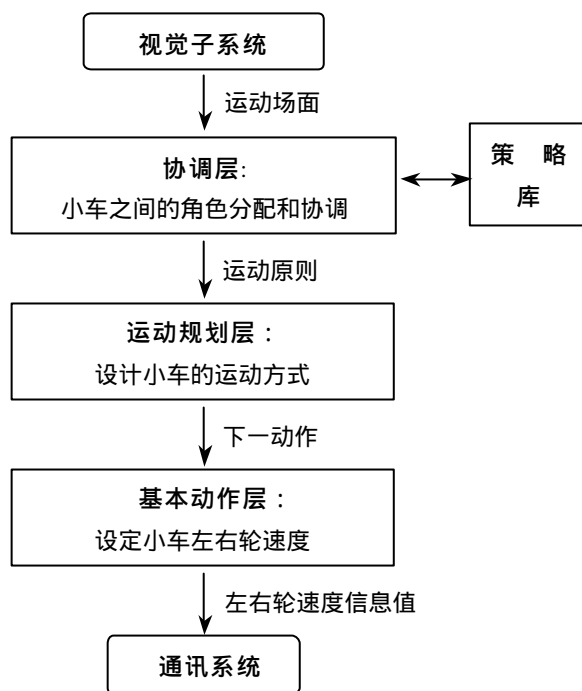


图 6-1 三层决策流程

三个机器人进行统一控制。

分层递进控制方式的具体分层方式可以有一定的不同,本文中的三层决策模型就是把决策的层次分为协调层、运动规划层、基本动作层,决策的结构及流程如图 6-1 所示。

决策模型中的协调层突出的是机器人之间的协调组织,通过从整体上分析场内形势做出群体的协作意图,然后将协作意图传到运动规划层。运动规划层将意图分解为各个机器人的目标,并将目标进一步细化,进而形成小车运动的具体方式,这些运动方式以函数调用的方式传到基本动作层,由基本动作层完成运动指令的设定,即生成车轮的速度指令。

6.1 基本动作层

基本动作层是决策的最底层,它将由运动规划层产生的阶段性目标和具体的行动指令对应起来,生成一定的运动指令。快速和准确是该层设计的关键。

基本动作层内的函数是被动调用的,它由运动规划层调用,它的输出是机器人运动指令,直接传送到通讯子系统,由通讯子系统发射到机器人小车。

根据前部分所述的机器人小车运动学和动力学模型,对机器人小车的位姿控制可以通过对小车两个车轮的控制来实现。

基本动作层是由一些称之为基本动作的动作指令生成模块组成。基本动作指不可分解的动作,和机器人运动的控制紧密关联,在某种程度上,它的功能和机器人车载控制器的功能有重叠。由于车载控制器的控制程序已经固化在车载芯片内,而且车载芯片处理能力受限,基本动作层有时必须能补偿车载控制器的不足。

我们所用的基本的控制函数主要包括线运动函数和转角运动函数。

基本动作层的函数现在用得最多的是余弦比例控制或 PID 控制。

1. 余弦比例控制

在三层决策模型中使所用的线运动函数是采用余弦比例控制。其算法描述如下:

$$v_L = K_p d \cos \alpha + K_a \alpha \quad (6-1)$$

$$v_R = K_p d \cos \alpha - K_a \alpha$$

式中, d 为机器人到给定目标点 T 的距离, α 为目标点和机器人之间连线及机器人方向 n 之间的夹角。示意图如图 6-2。

转角函数要求机器人原地或者前向运动并转向给定的角度。它和线运动描述很相似,但是,转角函数中的 α 是期望的目标角度,是给定的,而线运动函数的 α 是给定目标点后计算得来的。

为保证动作的连贯,尽量少使用动作的类型,以下列三种动作为例:

1) Turn2Angle(): 使机器人指向给定的角度。

2) Move(): 使机器人以一定的速度沿给定方向运动。

3) ToPosition(): 使机器人到给定的目标点。可以设定机器人到达目标点时的状态,例如停止或者穿过目标点。

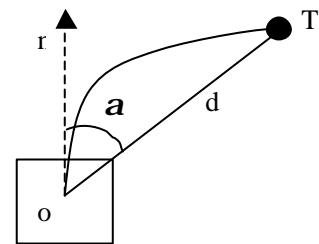


图 6-2 基本控制函数示意图

2. PID 控制

基本动作层的函数经常使用 PID 控制,采用 PID 控制能使机器人快速准确的执行底层动作。

按偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 线性组合进行控制的方式叫 PID 控制。它存在比例、积分和微分三种控制作用。

比例控制的优点是:误差一旦产生,控制器立即就有控制作用,使被控制量朝向减小误差方向变化,控制作用的强弱取决于比例系数。它实际上是一种线性放大(缩小)作用,有些类似于人脑的想象功能。微分作用体现了某种信号的变化趋势,能对误差进行微分,敏感出误差的变化趋势。增大微分控制可以加快系统相应,使超调量减少,增加系统稳定性。积分作用具有对误差信号的记忆功能,能有效消除静差,但控制作用过强会使控制的动态性能变差,甚至使系统不稳定。

足球机器人需要快速、准确、有效的转角或运动动作。经常采用比例控制或比例微分控制。

在决策系统中,基本动作层只是充当决策与机器人的接口,由上层的路径规划层调用,基本动作层自身不做任何主动的决策。但是,基本动作层是决策的出口所在,它的性能直接影响到小车对决策的响应。

6.2 运动规划层

运动规划层是将协作意图进行分解细化的部分,因此运动规划层具有主动设计的能力。它体现了群体协作与个体之间的对应,即如何通过个体的运动来反映群体协作的整体效果。因此,它注重的是个体要完成什么动作。

运动规划层的输入是协调层生成的意图,其描述包括每个机器人的最终运动目标点、机器人在该目标点的位姿以及机器人在运动过程中应遵循的原则。运动规划层没有直接的输出量,它最终调用基本动作层的函数完成对机器人的控制。

运动规划层设计的要求包括规划速度要快;控制周期之间规划的衔接应该连贯;规划的运动方式本身应该平滑,并尽可能简洁;如果要求避障,规划层应考虑到有障碍物情况下的运动规划,寻找快速和避障的最佳平衡点。

通过合理调用直线和转角运动控制,使机器人在任意位姿下以一条平滑的运动轨迹到达目标位姿,这种运动控制方法属于点位运动方式 PTP (Point to Point)。在三对三模型中,所有的路径规划都属于 PTP 方式。

针对 Mirosot 系列足球机器人系统,一般有两种路径规划方法,一种是根据快速移动机器人实时避障方法而提出的基于势力场的路径规划方法,另一种是基于中垂线原理的路径规划方法。

1. 基于人工势场的路径规划方法

这种路径规划方法是 将 $150\text{cm} \times 130\text{cm}$ 的整个比赛场地虚拟成一个有力存在的场地,把力分为引力和斥力,根据比赛的进行,场上队员位置会发生变化,因而整个力场中各部分的

受力情况也会发生变化,因此决策系统就可以根据场上的这种变化去实时地控制足球机器人的运动情况。

具体地,首先建立斥力场和引力场。在足球机器人的周围,分布着环状的虚拟力场,各环用环带的宽度和此环的斥力系数来表示,各个足球机器人之间表现为排斥力,通过设置各环的参数可以调整队员周围的力场。这样做有两个目的:一是在双方机器人因为争球而发生碰撞时,可以在一定程度上起到缓冲的作用,以减少对机器人本身机械结构的损坏;二是在追逐争球时可以平滑地绕过对方球员,达到实时避障、夺得先机的效果。

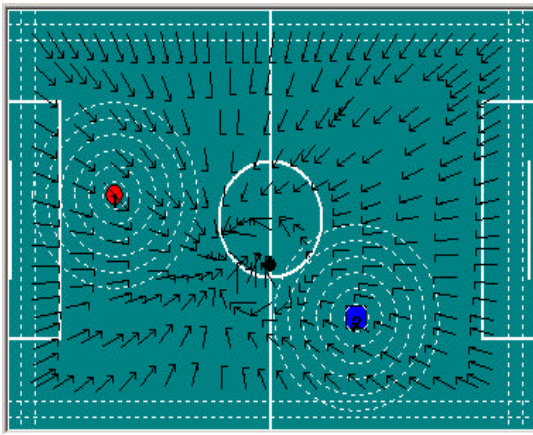


图 6-3 势力场的虚力显示图

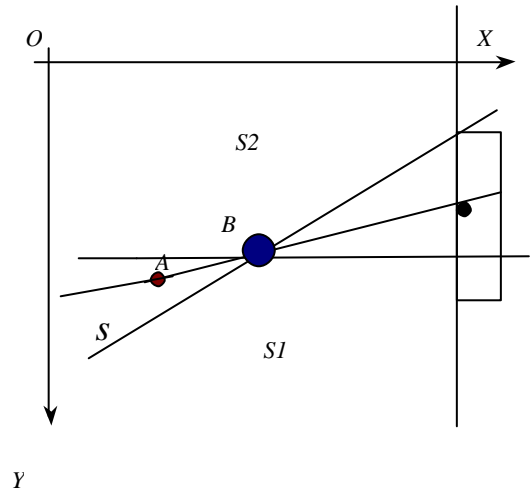


图 6-4 势力场的部分区域分析图

在球场四周同样也设置了两条环状的斥力场,也是通过环带的宽度和斥力系数来描述,其目的主要减缓机器人小车碰向墙的力度。

图 6-3 用小箭头描绘了场中虚拟立场的存在情况,显示的是进攻方(红方)的势力图,目标是右方的大门。我们可以通过设置参数来改变场上力的大小。

势力场的部分区域分析图如图 6-4 所示,球与球门中一点连线与 X 轴成一角度,该角度加减小一个角度常量后形成一个扇形区域,扇形区域两边线作反向延长线后形成区域 S,此区域称为有利进攻区域,而 S1, S2 区域一般称为调整区域,其引力点设在 BT 的反向延长线上如 A 点位置。一旦进入有利进攻区域,则调整引力目标点使其靠近小球,当队员与小球达到一定距离时,则把引力目标点直接设在球门某点,而小球形成的斥力将取消,此时,便形成带球进攻或射门形式。

2 基于中垂线原理的决策路径方法

如图 6-5 所示,分别作小球与球门中一点的连线 BT,小球与我方队员身上一点的连线,两线交于小球,作机器人与小球连线的中垂线,交 BT 的延长线上一点目标点 A1,队员有朝该点运动的趋势。在下一周期时,重新规划上述三条线,得出新的目标点 A2,再在下一周期得到的新目标点为 A3。依次类推下去,目标点将最终趋向于小球。

同样该方法也有有利攻击区域和调整区域,一般情况下,当小球只要处于我方攻击机器

人和球门选定目标点的中间区域时，就可视为有利攻击期，当我方机器人在小球和球门选定目标点的中间区域时，则被视为调整位置期。

在调整位置期当中有一种情况是机器人处于球和对方球门之间，这个时候机器人小车不能直接用中垂线原理的方法求阶段性的运动目标点，需在决策部分的相应算法来实现控制小车首先绕到球的另一面，使足球处于进攻机器人和对方球门之间，然后再运用中垂线的方法求得下一步的行动目标点。

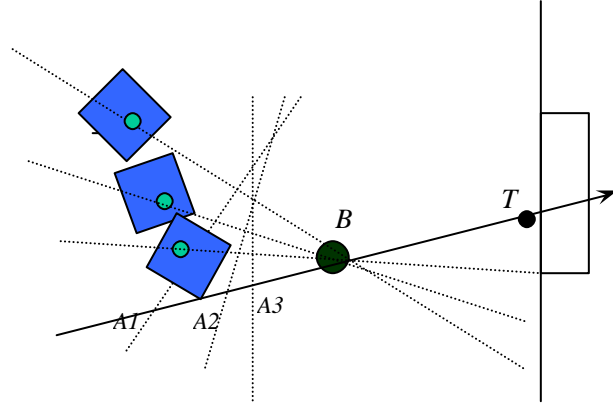


图 6-5 基于中垂线原理的路径规划

3 路径规划基本算法

在人工势场辅助全局路径规划法中，把双方机器人和小球看成可自由移动的质点，各质点用 X, Y 的二维平面坐标来表示位置，而力是有大小和方向的矢量，所以把力分解为 X 方向和 Y 方向。

两质点间的斥力矢量表示为：

$$F(i, j) = \frac{F_{cr} C(i, j)}{d^2(i, j)} \left[\frac{x_i - x_0}{d(i, j)} \vec{x} + \frac{y_j - y_0}{d(i, j)} \vec{y} \right] \quad (6-2)$$

其中 F_{cr} 为斥力常数， $d(i, j)$ 为两质点间的距离， $C(i, j)$ 为环带斥力常系数， x_0, y_0 为我方质点的坐标， x_i, y_i 为对方质点的坐标。

某质点所受斥力之和为：

$$F_r = \sum_{i, j} F(i, j) \quad (6-3)$$

某质点所受引力为：

$$F_t = F_{ct} \left[\frac{x_t - x_0}{d(t)} \vec{x} + \frac{y_t - y_0}{d(t)} \vec{y} \right] \quad (6-4)$$

其中 F_{ct} 为引力常数(对于目标)， $d(t)$ 为己质点和目标点的距离， x_t, y_t 为目标点的坐标。而某质点所受矢量和等于自身所受引力和斥力的总合，即

$$F = F_t + F_r \quad (6-5)$$

最终所控制的我方队员只受由公式 (6-5) 得出的总合力的影响，我们通过调整经验值 F_{cr} , F_{ct} , $C(i, j)$ 的大小，可以很好的控制机器人小车的运动。

在中垂线规划路径算法中，主要是求解如某一线段的中垂线方程、求两直线相交交点的方程组等，另外要考虑会出现的不同情况，当我方队员处于小球和目标点之间的区域时，不能直接用作中垂线的规划方法，要加入适当的规则控制语句，根据足球所在位置来设定机器

人的阶段行动目标点，调整其位置，再使用该规划方法来规划路径。

4. 其它路径规划方法

除了以上几种还有其它路径规划方法。例如曲线规划法，基于遗传算法的路径规划法，小脑模型神经网络控制法等等。很多高级控制算法都可以运用到路径规划中。

6.3 协调层

协调层的目的是完成场地数据的知识提取、目标的制定和机器人的角色分配协调。知识的提取就是从视觉子系统发送来的数据中分析出当前场上的形势，比如是否对己方有利，前面的决策是否得到有效的执行。然后提出是否继续完成已指定的任务还是重新指定任务，并确定各机器人的角色。

正因为存在统一控制的协调层，使得整个决策控制成为一个集中控制的整体。决策子系统在逻辑上和人类比赛中的协作及个体控制有很多相似的地方，只是集中控制的协调层在对机器人的控制力度上远远超过了人类的教练。

协调层的输入是视觉子系统分析后得到的机器人和球的位置信息，其输出为己方各机器人的运动目标和运动原则（如保守、积极）。

该层的实现方法主要是采用专家系统，其推理是基于规则的，也就是 IF—THEN 方式。

现在的决策判断主要有两种方法：场地分区法和相对位置法。

1. 场地分区法

三层模型中早先采用的是分区法，它也是国内外很多队伍使用的方法。它将场地按一定的规则分区，当机器人处于不同的区的时候，采用相应的决策方法。其好处是简单直观，决策依据明显。

决策将场地分为若干个区，图 6-6 即为一种前后场的划分方式，它将场地区划分为 A_0 ——球门区， A_1 ——后场区， A_2 ——中场区， A_3 ——前场区。其决策有如下的框架：

说明：NR：距离球较近的机器人，FR：距离球较远的机器人。）

//ball in home area

IF (ball in A_0) use strategy II

IF (ball in A_1 - A_2)

IF (NR has good pt to kick) use strategy III

IF (NR has poor pt and the distance not near and FR has good pt relatively)

FR use Lefdense action

Else //(both right of ball or NR is not far from ball)

NR use Lefdense action, and FR to pt between ball and goal (block)

//ball in enemy area

IF (ball in A_3) use strategy I

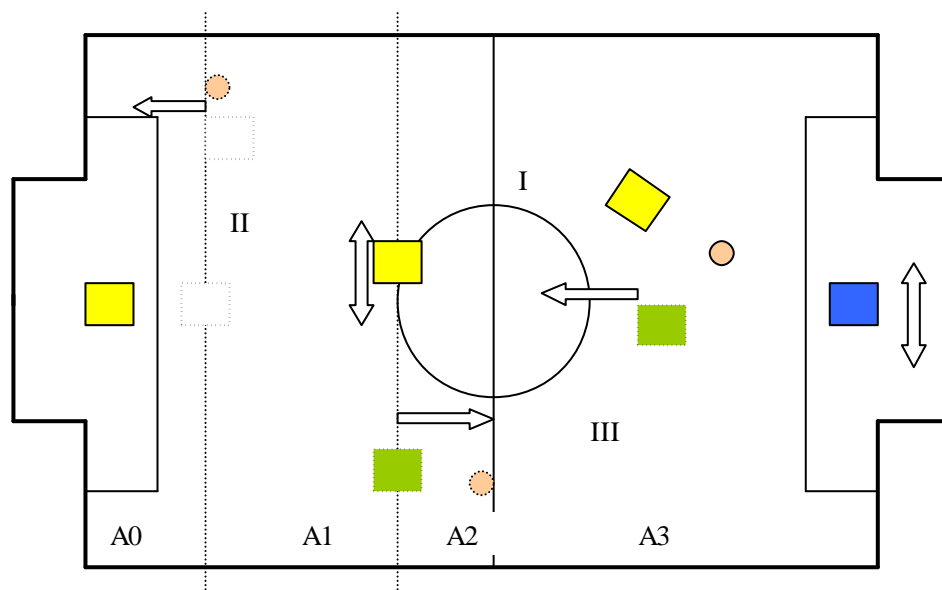


图 6-6 前后场方法示意图

协调层共采用三种协调方式：

1、 strategy I：

它是射门所用的协调方式。其意图是当球在 A_3 区域的时候，靠近球的机器人执行射门，另一个机器人到某个接应点，当前一个机器人无法完成射门动作的时候，由这个机器人完成补射。

2、 strategy II：

一种兼顾进攻和防守的策略，也就是让一个机器人去控球并将球向前场带，同时，另一个机器人挡在球和球门之间，防止对方射门，从程序中可以看到，这个策略是有在中后场的区域。

3、 strategy III：

其意图是当球在靠近球门的区域的时候，由守门员去阻挡球，同时，其他的两个机器人守在禁区的边缘，封死对方进攻的角度，由于规则的限定，在禁区内不能同时有己方的两个机器人，所以，strategy III 必须保证己方的机器人不会同时有两个在禁区内。

区域划分的方法直观易懂，便于实现。存在的不足是：

- 1、 当某区域内的机器人被堵住或不能正常运作时，另一个机器人会坐视不理。
- 2、 当球在两个区域交界的地方时，有可能在经视觉的识别后，球在两个区来回振荡，决策也不断来回变化，这使得机器人出现运动振荡的情况。

2. 相对位置法

相对位置法是在总结分区法优缺点基础上，为提高对场地形势判断的准确性而提出的协调方法，是对场地分区法的增强。相对位置法依据各机器人以及球之间的相对距离对场上的形势进行评价。根据机器人和球的位置、速度确定哪队更倾向于控球，并适当选择进攻和防守的策略。其前提是数据的准确性，由于视觉子系统自身的限制，速度只能是一个比较粗略的数字，只能反映机器人和球的运动趋势，这样的判断的可信度不会太高，对此我们加入了场地分区的一些方法，也导入前后场的概念，当球在前场的时候，协调决策的

判断趋向进攻，并采用一些更积极的策略，而当球在后场的时候，协调决策判断趋向保守，这种积极和保守体现在选取不同的机器人运动方式上。如果我们采用图 6-6 的前后场划分方式，可以建立以下决策方法的框架：

```

Calculate Relative Distance of Objects
Calculate Velocity of Objects
IF(we control the ball) THEN                                //
    IF(ball in A3 or A2) THEN
        ( AttackMode )
        IF(ball on proper point for shoot) THEN
            Shoot
        ELSE
            Cooperate to Shoot
        ENDIF
    ELSE
        ( DefenceMode )
        IF(ball in A1) THEN
            Approach Ball by ConservativeMode
        ELSE //ball in A0
            Catch Ball by Goalie
            Other Members on Proper Position
        ENDIF
    ENDIF
ELSE IF(opponent control the ball)
    IF(ball in A3)
        (AttackMode)
        Recapture Ball and Prepare to Attack
    ELSE
        (DefenceMode)
        IF(ball in A1 or A2)
            Recapture Ball by ConservativeMode
        ELSE //ball in A0
            Catch Ball by Goalie
            Other Members on Proper Position
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

决策中加入了对控球的判断（标号 处的判断）。程序首先判断控球方是谁，如果是己方控球，那么，球在球场大部分区域（ A_3 、 A_2 区）的时候，己方都会是积极进攻的态势。

当控球方是对方的时候，首先要拦截球，再考虑按照球所在区域进行进攻。

通过以上的框架基本可以覆盖场上的各种情况，加上适当的边界处理就形成了我们的决策模式。

使用这种决策方式，在原来机器人和球的位置数据中加入了速度的数据，这样就能够决策中考虑机器人的动态状态，对场地的形势的判断要比以前准确些。比如机器人和球向相反的方向运动，那么该机器人控球的机会可能甚至不如离球较远但与球相向运动的机器人。

上面所说的决策的框架是很粗略的，只是描述了第一层次的形势判断和协调策略的选择，之后还要形成每个机器人的最终目标点。决策中目标点的设定都是采用比较简单和固定的算法。

三层模型在足球机器人领域得到广泛应用，很多队都使用的这种方式，可以说，这种模式已经发展得比较成熟。

这种体系结构的各层在逻辑上是紧密关联又相对独立的，所以，设计过程允许对各层分别设计，设计某层时，将其他层对该层的影响作为约束条件加以考虑。这样使设计的过程大大简化，便于分析和实验。

使用全局控制器模式能从整体上把握场上队员的情况，各个机器人被视为全局控制器的执行机构，因此，这种决策模式属于单智能体模式。决策的流程从上至下，数据流是单向的，在策略库和推理机制完善的情况下，可以高效地完成任务。但这种模式没有体现将每个机器人视为智能体的特征。另外，这种模式下所有机器人共用一个策略库，这使得必须一次性生成三个机器人的指令，但由于职能不同，机器人各自的决策所需资源开销不同，一次性生成指令则强迫所有机器人决策时间一致。因此，全局控制器方式一方面减少机器人的交互，节省了开销，另一方面却造成了部分浪费。

对此，现在趋向于引入多智能体模式（Multi-Agent），Multi-Agent 在足球机器人领域的应用很广泛，特别在 RoboCup 的比赛中形成了很多有效的 Agent 结构，如德国 Klaus Dorer 得到的 REASM，美国南加州大学的 ISIS 结构等。如果在决策中引入多智能体思想，将每个机器人视为一个 Agent，享有独立的资源空间，由于系统硬件环境不变，每个机器人对环境变量的获取仍然是全面的，它独立审视场上形势并进行群体协调。形成群体意图后，每个机器人独立完成自己的任务。在这种模式下，每个机器人有自己的策略库，体现了机器人的个性。双层模型在部分上实现了这种设想。

第 7 章 足球机器人系统仿真

简单的说，仿真就是建立相应物理系统的数学模型，并在计算机上进行解算的过程，这是因为我们通常可以用数学方程来描述客观世界里的物理现象和物理系统，而计算机是一种最好的解算工具。随着科学技术的发展，仿真技术的应用也在扩大，仿真已不局限于建立系统的数学模型和进行计算机解算。分布式交互仿真、多媒体仿真以及虚拟现实等仿真技术也相继出现。

国内学者把系统仿真定义为：系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算技术等理论基础之上的，以计算机和其它专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实或假想的系统进行试验，并借助于专家经验知识、统计数据和住处资料对试验结果进行分析研究，做出决策的一门综合性的和试验性的学科。

系统仿真实验具有形象、科学、简易、安全、经济、实效的优点，实验可以多次重复，不受气象和场地环境的限制。“形象”是指仿真模拟训练装置生动、直观，可以提高学员参加培训、考核的兴趣和热情，借助人的观察力判断力快速考察所建模型的正确性；“简易”是指仿真模拟训练装置可以将复杂的技术动作，操作要求经过科学提炼、归纳，使之简单化、科学化，容易操作训练；“安全”是指有些仿真模拟设备可以设置在正常情况下无法出现的特殊故障和紧急问题，供学员反复训练提高排除故障和对紧急问题的应变能力；“科学”是指使用仿真模拟装置采集的各种培训、考核数据科学准确，可以排除人为因素，使培训考核成绩真实可靠，作到公开、公正、公平，提高培训和鉴定的质量；“经济”是指这类装置一般体积较小、占用场地少，利用率高，可以节省大量设备投资，节约能源和原材料的消耗，节约培训时间，从而降低成本；“实效”是指在训练考核过程中可以推广标准化作业和规范化服务要求，通过提高从业人员的专业素质，提高企业的经济效益和社会效益。

机器人足球仿真系统属于一种可视化仿真，机器人足球仿真系统主要有三个工作要做，一是进行整个仿真系统框架的软件搭建；二是设计仿真系统的“大脑”即决策子系统；最后是设计场上各个对象的数学模型，再以动画形式表现出来。

国际上已经开发出来了 MiroSot5 对 5 仿真平台，并且设立了相关项目的比赛。

7.1 仿真系统的研究背景与作用

开发仿真系统就是为实际系统中策略过程开发和控制算法可行性的验证提供一个支持平台，对策略的运行和控制算法的控制效果进行一种理想状态下的仿真。

仿真系统的作用就是在程序结构中对实际系统中的视觉子系统和通讯子系统做透明处理。如图 7-1 所示，虚线框中的视觉处理和通讯发送两个过程的功能将由仿真系统来模拟。另外就是希望所开发的仿真系统要做到与实际系统尽可能地兼容，使仿真系统中用到的一些模块代码如决策子系统的代码只要经过尽可能少的改动就可以直接运用与实际的比赛系统。

这里提到的仿真系统是针对 MiroSot 系列比赛设计的，所以应该支持实际的比赛系统所

使用的一些标准：

- 1) 场地设置和车的几何结构。仿真场景中赛场边线、禁区、中场等等的划分都是按实际赛场比例处理的。所用的机器人小车全是立方体的。
- 2) 视觉结果格式。仿真系统所模拟的辩识结果为 3 个变量，即场上物体的 x 、 y 的坐标值以及小车正方向与 x 轴正方向的夹角。
- 3) 决策系统最终的结果。实际系统中通讯子系统发送的每组数据是小车的号码和该小车对应的左右轮轮速，同样这里仿真系统动态显示部分接收的也是这几个参数。

因此，该仿真系统的输入是来自决策子系统发给机器人小车的控制指令，输出的是视觉处理后的结果（场上所有对象的位姿）。仿真系统完成的主要功能是完成场上各对象的运动描述和碰撞处理。

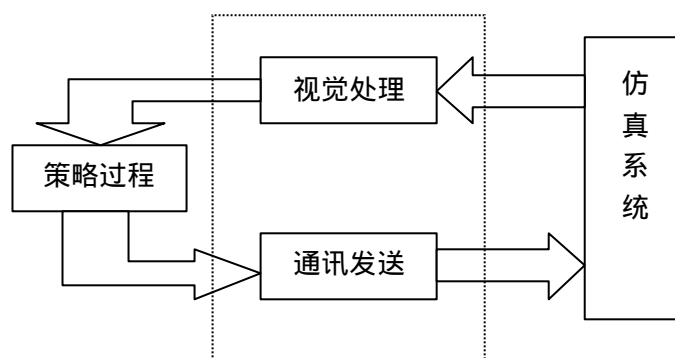


图 7-1 仿真系统的作用

7.2 仿真系统中决策子系统

要使仿真系统动态的模拟一场足球比赛，那么首先决策子系统的设计是必不可少的，没有策略系统，则这个仿真系统就好像一个人没有脑袋，无法思考。在整个足球机器人系统中决策子系统的任务是根据当前球场上的比赛形势，实时的做出部署，发出相应的控制指令，其作用就相当于教练员。而我们也知道，不同的教练员是有不同的指挥作战特点的，水平也是有高低的，也只有这样，才能分出决策系统的优劣，才能分出比赛的胜负。显然，这种部署的思想必然是丰富多彩、千变万化的。

在人类实际的足球比赛中，教练员和球员对场上的形势判断一般都是比较形象的，如球在我方半场且被对方控制，那我方的策略是主防，又如球虽在我方半场，但已被我方队员截下，且我方有一名队员埋伏在对方半场，那策略可以是快速传球给他等等。我们在足球机器人的比赛中也可以如上一样组织策略，另外对比赛场地上机器人小车的信息处理常常是基于模糊概念上的，如快、慢、远、近、有利、无利等等。而我们决策系统从视觉系统接收来的只是精确的位置数据，决策系统面对的也是精确的数据和刻板的程序语言。如何将教练员的决策思维过程形式化、规范化，并用计算机程序表现出来，这属于知识工程的范畴，崭新的前沿领域。这也是机器人足球比计算机下国际象棋更具挑战性的要点所在，也是决策子系统的难点所在。

实际上，仿真系统中的决策子系统与实际足球机器人系统中的决策子系统差不多，都是根据现场态势作出判断，给出机器人小车的左右轮速度指令。唯一不同的地方就是接口。仿真系统中，决策部分所收到的机器人位姿信息是计算机模拟出来的，而真实的系统则是通过视觉子系统传输进来的。决策部分输出的机器人小车左右轮速度是直接给仿真平台，而真实系统则是传输给通讯子系统。

前面说到决策子系统充当的是教练员的重要角色，但是教练员本身不能够直接“看到”场上的比赛情况，那么教练员是怎么得到场上的必要信息来完成对各个队员的调度呢？它是根据由视觉子系统传过来的每个队员和球的精确的位姿信息，在仿真系统中则是以直接显示的位置信息传送来给决策系统，之后决策子系统对场上形势做出逻辑推理，实时的确定当前的行动目标点，最后发出速度指令来完成对队员的调度的。这个过程可以分为以下几步来表示：

- 1) 场地上位姿信息的预处理。
- 2) 形势分析和策略选择。
- 3) 阶段性目标的确定。
- 4) 实现方法的确定。
- 5) 控制轮速的确定。

之所以称决策系统是智能控制系统，是因为系统一旦调试完成，投入到比赛中后，该系统用于驱动足球机器人以实现其目标时就无需操作人员去干预了，系统本身具有根据场上形势做出相应智能调度和执行的能力。

这里以基于萨里迪斯等人所提出的递阶智能控制理论的足球机器人决策子系统为例，之所以选用智能决策控制方法，是因为该方法具有适应性强、扩展性好、简洁高效的特点。

下面介绍一下该系统的设计方法：

从控制的角度来说，图像识别和指令输出只是完成了数据形式的变换和传输，因而可以把视觉子系统和通讯子系统视为决策子系统的一个部分。因此整个系统为一个闭环控制系统，而决策子系统是整个足球机器人系统的控制器，因而成为整个系统的关键子系统，决策效果的好坏决定了整个系统的性能好坏。

针对控制比较复杂的三对三比赛情况来简要说明决策子系统的设计情况。决策子系统用VC++语言编写，载体是计算机，其决策功能由计算机内运行的决策程序实现。以视觉系统返回的图像数据为依据，经分析后，从策略库中调出合适的决策方式，并将其参数化，形成机器人的运动指令。同时，对指令的执行效果做出评估，如需要，则对决策库做一定的修改。最后，将指令发送给通讯子系统，并要求通讯子系统向机器人发送指令。

决策子系统设计应考虑的问题：

- 1) 足球机器人比赛环境复杂，决策子系统面对的是一个复杂、动态、难以准确得到模型的环境。决策子系统应能适应复杂的环境，为进一步的决策提供良好的背景数据基础。
- 2) 由于决策的目的就是取得比赛的胜利，所以决策子系统应该能适应并击败对方。因此，策略库应该是开放性的，决策子系统应具有一定的自学习的能力。
- 3) 由于必须实时控制小车，因而决策必须满足实时性要求，能在较短的时间内完成

决策过程，决策时间越短，实时性越好。

由此可见，决策子系统应满足适应性好、具有自学习能力、实时性好等几方面的要求。我们采用的是目前国际上该领域比较流行的分层递阶控制的方法，从根本上来说，这是一种集中控制方式，即用一个全局控制器，对机器人进行统一控制。三层决策模型就是一个很好的例子，在前面章节中已经有阐述。

7.3 仿真系统中的数学模型

对实际的足球机器人比赛的仿真工作一方面是建立各个对象的静态模型 如大小、质量、摩擦系数等属性；另一方面是建立对象的动态模型，如速度、加速度等，特别是对对象之间的碰撞检测和处理，由于静态模型较为简单，这里主要讨论对象的动态模型。目前有不少这方面文献，当中多数给出了实体的运动模型和简化处理的碰撞模型。

7.3.1 几何模型

在此仿真系统中将机器人小车定义为二维正方形，表面有队标和队员标志的显示，可以从色标直观看出车体的正方向，球是圆形，车体和球的质心位于车体和小球的几何中心，车体、小球和场地中禁区范围大小、球门距、中圈等都是按实际比赛场地的比例设定的。

7.3.2 车体运动模型

各种轨迹规划的目的是共同的，都是为了实时地得到下一周期的运动目标点，只是目标点的选取方法不同，每当目标点确定后，总能根据决策系统，得到当时期望的运动方向角和运动速度。通过发送控制机器人左右轮的速度指令来调整它的运动方向和速度，使它朝目标点运动。车体运动模型如图 7-2 所示， R 为转动半径， Δq 为 Δt 内转动圆心角， A 为机器人 t 时刻位置， B 为机器人 $t + \Delta t$ 时刻位置。

假设车体在水平面内运动，车轮与地面之间无滑动，车体作圆弧运动时的平面如图 7-2 所示。当 Δt 时间内车体从 $A(X, Y, q)$ 做圆弧运动到 $B(X + \Delta X, Y + \Delta Y, q + \Delta q)$ ，两轮运行时距离分别为 ΔS_L ， ΔS_R ， L 为左右两轮间距。则

$$R = \Delta S / \Delta q \quad (7-1)$$

$$\Delta S = (\Delta S_R + \Delta S_L) / 2 \quad (7-2)$$

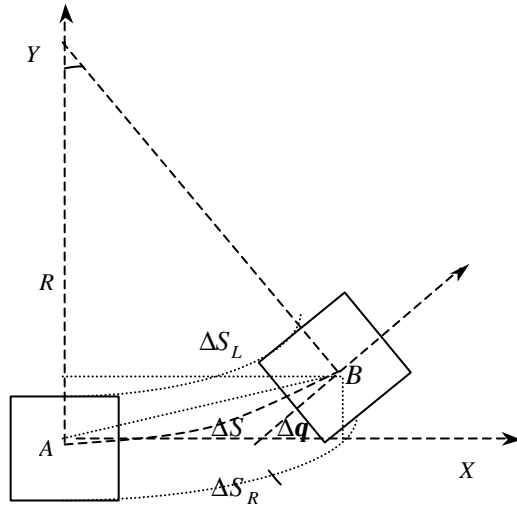


图 7-2 车体运动模型

$$\Delta q = (\Delta S_R - \Delta S_L) / L \quad (7-3)$$

$$\Delta X = AB \cos(q + \frac{\Delta q}{2}) = 2R \sin(\frac{\Delta q}{2}) \cos(q + \frac{\Delta q}{2}) \quad (7-4)$$

$$\Delta Y = AB \sin(q + \frac{\Delta q}{2}) = 2R \sin(\frac{\Delta q}{2}) \sin(q + \frac{\Delta q}{2}) \quad (7-5)$$

式中 R 为车体运动圆弧的半径, ΔX , ΔY , Δq 为 Δt 时间内车体位置横坐标、纵坐标和方向角的变化量。

当车体走直线时, $\Delta q = 0$, $\sin(\frac{\Delta q}{2}) / \frac{\Delta q}{2} \rightarrow 1$, 则式(7-4)和(7-5)可写为

$$\Delta X = \Delta S \cos q \quad (7-6)$$

$$\Delta Y = \Delta S \sin q \quad (7-7)$$

若采样时间取得足够短, 则实际运动情况与理想模型十分近似, 通过计算 Δt 时间内车体的位置变化, 进行累加, 从而求出车体在全局坐标中的位置。

7.3.3 小球运动模型

当足球在没有碰撞的情况下运动轨迹是一条直线, 如图 7-3 所示, 假设小球的当前位置为 $M(x, y)$, 质心当前速度为 v , 运动方向与 x 轴的夹角为 a , 小球在场上做匀减速滚动, 在每个周期内小球的运动模型为:

$$\left. \begin{aligned} s &= v \times t + 0.5 \times a \times t^2 \\ v_t &= v + a \times t \end{aligned} \right\}$$

(7-8)

其中, \bar{v} 为球心速度, a 是表示小球的加速度值, s 为时间 t 内移动的距离, 这是一个用户可以根据经验来设置的与场地情况有关的常量。

在仿真器中为球的速度保留了一个矢量结构体: (v, θ) 其中 $v \geq 0$ 是球的当前速度, θ 为 v 的指向方向与横轴正方向的夹角。由式(7-8)中的 s 和球的当前坐标 $(Ball_{ox}, Ball_{oy})$ 可得球下一周期的坐标 $(Ball_{tx}, Ball_{ty})$:

$$Ball_{tx} = Ball_{ox} + s \times \cos(\theta) \quad (7-9)$$

$$Ball_{ty} = Ball_{oy} + s \times \sin(\theta) \quad (7-10)$$

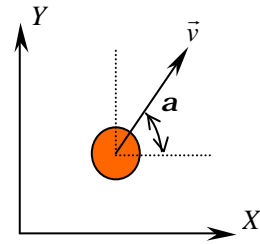


图 7-3 小球模型

7.3.5 足球碰撞模型

在足球机器人的比赛中, 双方队员的动作都是围绕足球来进行的, 而足球则是受到碰撞最多的对象, 如球和墙相碰、球和车相碰、车去撞球, 因此在建立足球的碰撞模型时, 既要注意考虑全面, 根据不同的碰撞情况建立相应的模型, 又要综合考虑多种碰撞可能同时出现

的情况。最后根据动能和动量守恒定律来求得小球的速度矢量值。再在仿真平台中以动画的形式来对其效果进行检验。

1) 足球与墙相碰

球和墙碰撞检测过程在仿真系统中扮演着一个很重要的角色,用它作为基础构筑了其它一些碰撞检测过程,因此这里要首先讨论球和墙碰的碰撞检测过程。如果把球看作一个点,那么球和墙的碰撞检测就变成了一个检查两条线段是否有交点的问题了。例如图 7-4,球(质点)处于 A 点经过一段时间后运动到 B 点, A 和 B 构成一条线段,墙的两个端点 C、D 构成一条线段,如果线段 AB 和线段 CD 有交点,球和墙就有碰撞发生,反之则没有碰撞发生。实际上由于球有半径,所以处理情况要稍复杂一些。

如图 7-5 所示,假设球从点 A 经一段时间后运动到 B 点,当球心位于 C 时与墙 HI 发生碰撞,碰撞的接触点是 D,则 CD 的长度是球的半径 r ,令 AB 与 HI 的交点为 O,则 $OC = r / \arcsin \angle AOI$,设直线 AB 与横轴的夹角为 a ,则可推出 C 点的坐标为 $C_x = O_x + CD \times \cos a$, $C_y = O_y + CD \times \sin a$,如果 C 在线段 AB 内则有碰撞发生,否则无碰撞发生。在求 C 点坐标时有两组解,还有一组解是 $C_x = O_x + CD \times \cos(a + p)$, $C_y = O_y + CD \times \sin(a + p)$ 。

实际的比赛场地共有前后左右四面墙,另外,为防止小球被墙角卡住,在四个角上放置了四块挡板,故有多种碰撞模式,图 7-6 显示了其中的部分模式。实际系统中墙是木制的,所以球和场地围墙发生的是非完全弹性碰撞,可以将它近似处理为弹性碰撞,即碰墙前和碰墙后的速度值是相同的,只是方向不同,图中 a 是足球在绝对坐标系中的方向角,坐标系的方向与屏幕坐标系相同, X 朝右为正方向, Y 朝下为正方向,角度旋转顺时针为正,反之为负。则入射角 a 在下述几种情况后分别变为:

- 与上下墙相碰时,碰撞后的方向角变化为碰撞前的相反数,即 $a = -a$
- 与左右墙相碰,碰撞后的方向角变为 $a = p - a$
- 与墙角挡板相碰

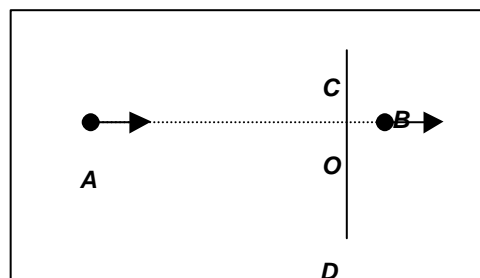


图 7-4 质点和墙的碰撞检测

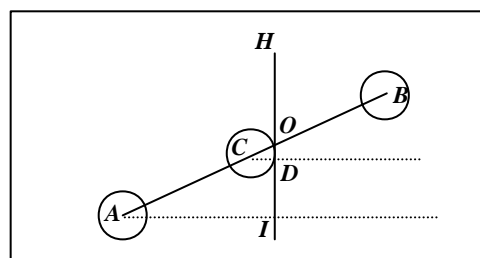


图 7-5 球和墙的碰撞检测

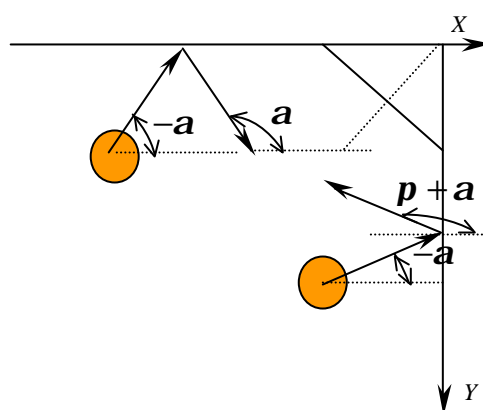


图 7-6 足球与墙相碰示意图

可分为左上、左下、右上和右下四种，下面单独对这种碰撞模式进行分析，我们可以以此为基础抽象出其中一些共性以简化系统的工作。如图 7-7 所示，设此时挡板与横轴之间的夹角是 b ，球的运行轨迹与横轴夹角是 a ，球与墙碰撞之后的运行轨迹与横轴夹角是 q ，这样经过推算得到反射角 $q = 2 \times b - a$ 。

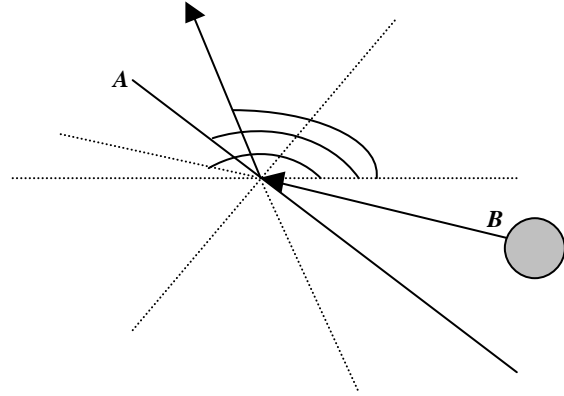


图 7-7 碰撞反弹

另外对碰撞后的小球速度，在本系统中是这样处理的，考虑到碰撞能量损失，弹出时的速度将由入射速度乘以一个能量衰减参数得到。

2) 足球与机器人相碰

一个车可以看成是由四个面所界定的区域，给定了车的位姿就可以求出车的四个顶点的坐标，应用上面叙述的球和墙面以及挡板相碰撞的检测算法就可以得出与车的每一边碰撞时小球的入射和出射情况。

3) 机器人与足球相碰

在实际的比赛中，由于机器人是四方体的，所以机器人与球相碰有 5 种情况，即正面、背面、两侧和四个拐角上。下面就分别进行讨论

a) 正面和背面碰球

将碰撞瞬间前的机器人和足球的速度矢量值分解为 X 和 Y 方向上的速度值，然后利用动能守恒和动量守恒可以分别求出在两个方向上的机器人和小车碰前碰后的速度值。再进行矢量的叠加就可以得到程序中小球碰后的运动方向和该方向上的速度值。公式如下：

$$(1/2)(MV_{r0}^2 + mV_{b0}^2) = (1/2)(MV_r^2 + mV_b^2) \quad (7-11)$$

$$MV_{r0} + mV_{b0} = MV_r + mV_b \quad (7-12)$$

式中 M 为机器人的质量， m 为小球质量， V_{r0}, V_r 分别为机器人碰撞前后的速度， V_{b0}, V_b 分别为足球碰撞前后的速度。如果要考虑碰撞时的能量损失的话，就可以将所得结果乘以一个衰减系数再输出。

b) 两个侧面碰球

这个时候只要考虑足球的反射和能量损失就可以了，此情况有点类同于球同球场边角挡板相撞的情况，在上面已做详细分析。

c) 四个顶角碰球

这种情况发生时，球被碰后的速度和方向角是很难预料的，为了在仿真中处理这种情况，我做了粗略的处理如下：当此情况发生时，机器人与足球之间的连线与 X 方向的夹角就是足球的弹出角，由于发生了能量损耗，小球的弹出速度为碰前速度乘以一个损耗系数。

在程序设计中以方程 $L \leq h + r$ 来检测是否发生碰撞的，其中 L 是机器人中心与球中

心的距离， r 是足球的半径， D 是机器人的边长， $h = (D/2) / \cos a$ ，在 $-p/4 \leq q \leq p/4$ 时， $a = q$ ，其他情况做相应变动。

这里还要注意，可能不止一个机器人或同时有墙碰到足球的话，这时要把足球各个方向上的速度矢量值进行叠加求矢量和。

7.3.6 机器人之间的碰撞情况

如果将机器人模拟为圆形物体，这样处理与实际系统有较大的差异，难以实现仿真研究的初衷。实际系统中由于车体为质量比较重的轮式立方块，两个立方块相碰后情况比较复杂，且有很大的随机性，所以本文在仿真系统的动画设计中只是把这种情况简化考虑为两个物体有无碰撞，即在一个周期内看两个车是否有重叠部分，即碰撞点，如果有则碰撞，否则无碰撞，根据经验将场上两机器人会发生的碰撞总结如图 7-8 所示四种情况。

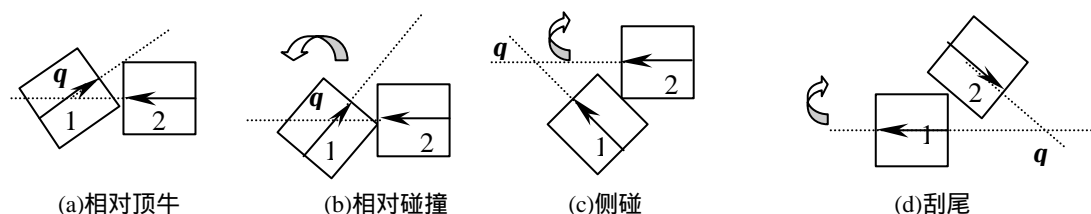


图 7-8 两机器人相碰

如图(a)中两机器人的方向夹角 q 满足 $135^\circ \leq |q| \leq 180^\circ$ ，且碰撞点是当中车 2 的前进方向上的顶点，此时发生顶牛，即两小车出现僵持；图(b)中两机器人之间的前进方向夹角满足 $90 \leq |q| < 135$ ，且碰撞点同样是当中一个机器人行进前方的一个顶点，则此时将 Robot1 的转角朝 Robot2 前进方向转一个偏移角；图(c)有几种情况当夹角 q 满足 $0 < |q| < 45$ ，则将碰撞点是顶点的机器人朝碰撞点不是顶点的机器人行动方向转一个小偏移角，当 $45 \leq |q| \leq 135$ ，两车处于僵持，当 $135 < |q| < 180$ 时图中 Robot2 朝 Robot1 前进方向的反方向转一个偏移角，以上的碰撞点同样满足(a)(b)中的条件；(d)中虽然两机器人夹角和(a)中满足的条件一样，但当中一个机器人的碰撞点并不在其前进方向的前方顶点上，而在其尾部，把这种情况称为刮尾，此时的处理方法是图所示的 Robot1 朝 Robot2 前进的反方向转动一个偏移角。通过以上处理，就可以比较接近的把实际场中出现的机器人碰撞情况来模仿，从视觉上再现一种逼真的效果。需要注意的是机器人的碰撞检测距离是一个与其方向和碰撞物方向有关的变量。

7.4 国际上 MiroSot5 对 5 项目 3D 机器人足球仿真平台

机器人足球仿真的概念和目的是在电子计算机环境中模仿韩国 Yujin 机器人的各种可能的物理工作方式。机器人足球仿真的最终应用包括了决策的开发，该决策可以运用于在未来 FIRA 机器人世界杯比赛中和现在开始的新型基于计算机 FIRA 世界杯上的 Yujin 机器人实体上。

7.4.1 系统要求

推荐机器人足球仿真系统运行环境：

Pentium III 600 MHz

256M 内存

32M 显存的 TNT2 3d 图像加速卡

24x CD-ROM

800x600 的分辨率

16 位声卡

windows 98

Direct X 8.0

10M 可用硬盘空间

7.4.2 开发要求

如果你要深入开发程序和写决策，推荐以下环境：

Director 8.5

专业编程经验

书 “Director 8.5 Shockwave Studio：training from the source”

7.4.3 界面菜单按钮及其基本说明

主界面如下：



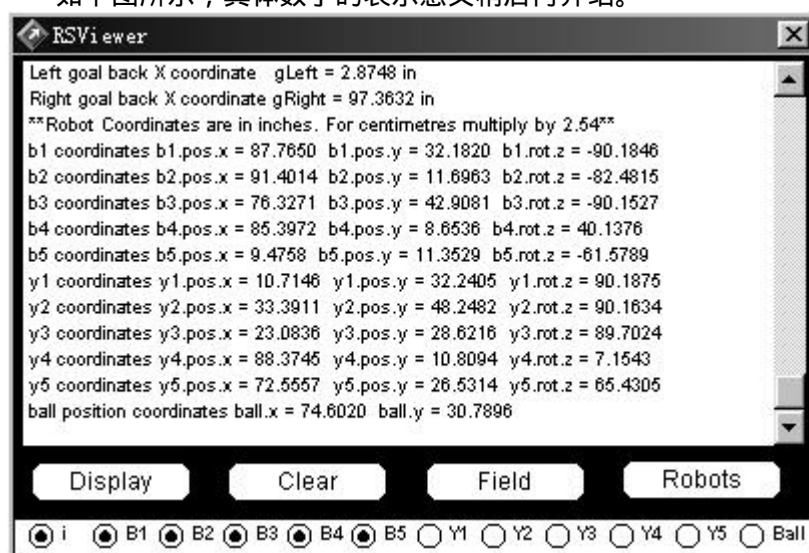
(一) Strategies - 用户点击，转到加载每个机器人队决策的菜单

1. 策略可以用 lingo 编码并且存放到文本文件中或者用 C++ DLL 编写。

2. 蓝队和黄队的决策的文本文件或 DLL 文件应分别放在 c:\strategy\blue 或 c:\strategy\yellow 下，装载 Robot Soccer 1.4 程序会自动生成这两个文件夹。在比赛之前只要在横栏中简单的写下文件名就可以了（不要带扩展名）。
3. 显示 LINGO 状态表示绑定 lingo 编写的决策，显示 C++状态表示绑定 C++DLL 编写的决策。
3. 点击 Send 加载决策到程序中。



4. 点击 Open Viewer 允许你观察程序中运行的变量值。
如下图所示，具体数字的表示意义稍后再介绍。



（二）开球模式菜单

根据裁判的判罚，进行开球模式的选择，由上至下依次为：争球，普通球，任意球，点球，门球。

Yellow Ball 和 Blue Ball 选项为某些开球模式时需要选择的开球方，例如：开球模式为任意球时，是黄队还是蓝队作为进攻方。



（三）Time/Score 菜单

如果需要调整时间和比分，裁判可以通过界面调整。

1. Time - 裁判能通过这些按钮调整时间，能通过调整一秒或一分间隔来加/减时间

2. Time - 修改后显示当前比赛时间

3. Score - 这是改变比分的地方。裁判必须简单地加亮他们想改变的比分并且敲入一个新数字。

（四）Start 按钮

加载完决策，选择好了开球模式，调整好了时间，就可以由裁判来单击 start 开始比赛了。

（五）比赛进行时的界面

如下所示：

界面上有三个按钮，从左至右分别为：重播，暂停，停止。



（六）重播时的界面

该界面有 VIEW 选项，分别表示重播镜头的角度，由上至下分别为：跟踪球，正上方中间俯视，蓝队球门区视角，黄队球门区视角，从蓝队方球门区俯视，从黄队方球门区俯视等等8种角度。



7.4.4 决策编程向导

1. 介绍机器人

蓝队

“B1”是策略中的全局变量。其位置可以由点结构获得“B1.pos.x”和“B1.pos.y”其旋度表示为“B1.rot.z”，单位为度。依此从“B1”到“B5”。

队员标默认值：大红：守门员

紫色：防守位置

玫瑰：防守位置

翠绿：攻击位置

淡绿：攻击位置

黄队

“Y1”是策略中的全局变量。其位置可以由点结构获得“Y1.pos.x”和“Y1.pos.y”其旋度表示为“Y1.rot.z”，单位为度。依此从“Y1”到“Y5”。

队员标默认值：大红：守门员

紫色：防守位置

玫瑰：防守位置

翠绿：攻击位置

淡绿：攻击位置

2. 机器人足球仿真策略的一些元素（一些全局变量）

1) GameState 有 5 个值

- 1 = Free ball
- 2 = Place kick (Kickoff)
- 3 = Penalty kick
- 4 = Free kick
- 5 = Goal kick

2) WhosBall 有 3 个值

- 0 = Anyones ball
- 1 = Blue ball
- 2 = Yellow ball

3) 球的位置：ball.x ball.y

4) 场地位置

- Ftop：场地上端墙的 y 坐标
- Fbot：场地下端墙的 y 坐标
- FRightX：场地右边墙的 x 坐标
- FLeftX：场地左边墙的 x 坐标
- GTopY：球门上端 y 坐标
- GBotY：球门下端 y 坐标

单位是英寸，如果决策部分要用 cm 作为单位的话，需要用一个厘米函数来转换成厘米单位。将来版本的机器人足球仿真平台中该函数会包括进来，现在你要创建一个厘米函数，如下：

```
On cm (cmValue)
cmValue = cmValue * 2.54
Return cmValue
End
```

5) 创建处理函数 “ on StrategyY ” 或 “ on StrategyB ”，这取决于你的机器人的队标颜色。比赛程序每秒钟调用该处理函数 60 次。必须调用处理函数“ velocity ” 来移动机器人。该函数有三个参数：

- 机器人全局变量的名称，例如 b1 或表示它的一个变量如 whichBot
- vl 的值（机器人左轮速度），范围[-125,125]
- vr 的值（机器人右轮速度），范围[-125,125]

所包括的任何处理函数都必须在 “ on StrategyY ” 或 “ on StrategyB ” 里。

注意：蓝队和黄队的变量和处理函数应该分别用 b 或 y 开头，全局 i 用于作为计数器变量，并且它的值不应该改变。

7.4.5 决策和 RobotSoccer1.4 仿真部分的接口

以 C++ DLL 为例：

1. 先构建一个名为 strategy 的 Win32 的 dll 工作区（工作区一定要名为 strategy），在创建向导的第一步选择“一个导出许多符号的 DLL”。
2. 修改 strategy.h 文件，将下列文件内容包括进去，以下给出该文件及其中文注释：

```
#ifndef Strategy_H
#define Strategy_H

#ifdef STRATEGY_EXPORTS
#define STRATEGY_API __declspec(dllexport)
#else
#define STRATEGY_API __declspec(dllimport)
#endif

#include <string.h>
#include <stdio.h>

const long PLAYERS_PER_SIDE = 5;
// gameState 变量的值，表示开球模式
const long FREE_BALL = 1;          //争球
const long PLACE_KICK = 2;         //普通球
const long PENALTY_KICK = 3;       //点球
const long FREE_KICK = 4;          //任意球
const long GOAL_KICK = 5;          //门球

// whosBall 变量的值，表示开球方对标颜色
const long ANYONES_BALL = 1;
const long BLUE_BALL = 2;          //蓝队
const long YELLOW_BALL = 3;        //黄队

// 一些关于场地信息的全局变量，单位是英寸
const double FTOP = 77.2392;
const double FBOT = 6.3730;
const double GTOPY = 49.6801;
const double GBOTY = 33.9320;
const double GRIGHT = 97.3632;
const double GLEFT = 2.8748;
```



```

const double FRIGHTX = 93.4259;
const double FLEFTX = 6.8118;

typedef struct //三维矢量结构
{
    double x, y, z;
} Vector3D;

typedef struct //边界结构
{
    long left, right, top, bottom;
} Bounds;

typedef struct //己方机器人位姿及输出的左右轮速度值
{
    Vector3D pos;
    double rotation;
    double velocityLeft, velocityRight;
} Robot;

typedef struct //对方机器人位姿
{
    Vector3D pos;
    double rotation;
} OpponentRobot;

typedef struct //球的位置
{
    Vector3D pos;
} Ball;

typedef struct //场上环境结构，即决策与仿真系统的接口变量
{
    Robot home[PLAYERS_PER_SIDE]; //己方机器人位姿及输出左右轮速度
    Ball currentBall, lastBall, predictedBall; //当前球、上周期球、预测的下周期球的位置
    Bounds fieldBounds, goalBounds; //场地边界、球门边界
    long gameState; //开球模式
    long whosBall; //开球方对标颜色
}

```

```

void *userData; //自定义的用户数据指针
char *display; //自定义的界面数据指针
OpponentRobot opponent[PLAYERS_PER_SIDE]; //对方球员位姿
} Environment;

typedef void (*MyStrategyProc)(Environment*);
/* MUST BE IMPLEMENTED */
extern "C" STRATEGY_API void Create ( Environment *env ); // 为用户数据指针分配空间
extern "C" STRATEGY_API void Strategy ( Environment *env );//决策入口函数
extern "C" STRATEGY_API void Destroy ( Environment *env ); // 释放用户数据指针

#endif // Strategy_H

```

3. 在 strategy.cpp 文件中定义以下三个函数：

```

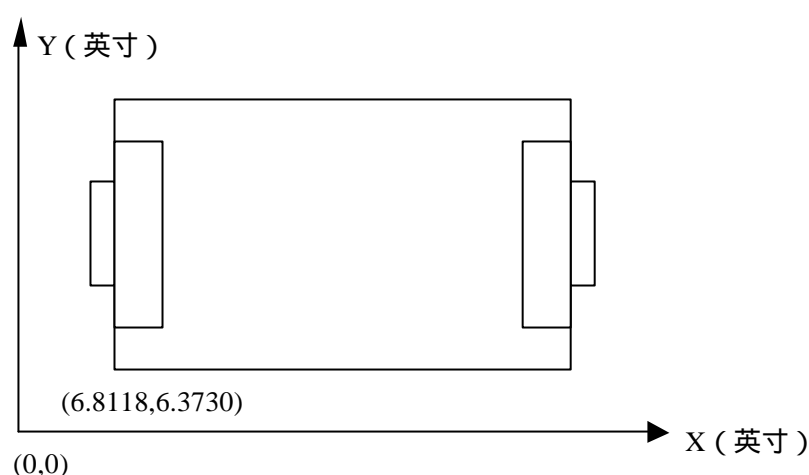
extern "C" STRATEGY_API void Create ( Environment *env );
extern "C" STRATEGY_API void Strategy ( Environment *env );
extern "C" STRATEGY_API void Destroy ( Environment *env );

```

决策部分程序的入口则是 Strategy (Environment *env) 函数，该函数调用决策部分主函数，得到己方每个机器人左右轮速度值，这些值放在 env 指向的 Environment 结构中。创建完该 dll 项目后，编译得到.dll 文件，将其拷贝到 c:/strategy/yellow 或 c:/strategy/blue 文件夹中，按照界面加载决策菜单的步骤进行加载就可以运行该程序了。

7.4.6 需要注意的一些具体事项

从 RobotSoccer1.4 传出来的机器人位置坐标如下图所示：



机器人角度单位是度，范围[0,360]，沿 x 轴正方向为 0 度，逆时针旋转。

Environment 结构中 home[PLAYERS_PER_SIDE]变量，当 PLAYERS_PER_SIDE=5 时，

home[0]中存放的是己方守门员的信息，队员标为大红色，home[1]中存放紫色队员信息，home[2]中存放玫瑰色队员信息，home[3]中存放翠绿色队员信息，home[4]中存放淡绿色队员信息。opponent[PLAYERS_PER_SIDE]变量存放对方机器人信息，具体内容依此类推。

黄队在左半场，蓝队在右半场。

第 8 章 结论与展望

我国开展机器人足球赛有力地推动了人工智能领域的研究与实验。智能机器人的研制早已列入“863”计划，我国科学家已研制成功了水下自主机器人，并且成功地进行了深海作业。机器人足球的研究目标之一是探索多个机器主体在不可预测的动态环境中如何进行通信联系，如何进行紧密的配合，这也正是当前人工智能领域的主要研究课题之一，因此，我国科学界和高等院校对于机器人足球的研究投入了大量的人力、物力和财力，力争通过机器人足球的研究，在国际人工智能研究领域取得新的突破。机器人踢足球看似游戏，其实展示了一个国家信息和自动化技术的综合实力。机器人系统在很多领域有着广泛的应用前景。比如在军事领域，系统中的协作控制与决策就可以用于无人作战平台群的协助控制，诸如无人驾驶飞机群的编队控制与敌方的辅助攻防对抗、海军舰队的编队与辅助协同作战，以及未来战场上机器人部队的组成与控制理论及技术支持等等。所以足球机器人的研究工作，对我国科学技术的发展有一定的推动和促进作用。

仿真机器人足球赛是在标准软件平台上进行的，这种软件平台的设计能够体现控制、通信、智能、传感等多方面的技术水平。仿真机器人足球的主要研究目标是动态主体系统中的相互配合、协同作战的战略战术以及机器人的学习提高等一系列的人工智能前沿领域的研究课题，机器人足球已经被专家们认定为未来 50 年人工智能研究领域的一个重要的组成部分，就如同国际象棋领域的人机大战被认为是过去 50 年人工智能领域的一个重要的组成部分那样。机器人足球赛的长远目标是：到 2050 年，在可比的条件下，机器人足球队要战胜人类足球队，让我们拭目以待这一天的到来吧！

附录一：

一个适用于 3D 机器人足球仿真的决策程序

用于蓝队策略

整个程序清单如下：

```
--Blue----
--Strategy_

Line 1: Global B1,B2,B3,B4,B5,Ball
Line 2: Global FTop,FBot,FRightX
Line 3: Global FLeftX,GTopY,GBotY_

Line 4: on strategyY

Line 5: Goalie(B1)
Line 6: Attack1(B2)
Line 7: Attack2(B3)
Line 8: Defend1(B4)
Line 9: Defend2(B5)_
-----_
Line 10: end strategyY

Line 11: on Goalie(whichBot)
Line 12: vl=0
Line 13: vr=0_

Line 14: Velocity(whichBot,vl,vr)

Line 15: end Goalie

Line 16: on Attack1(whichBot)
Line 17: vl=0
Line 18: vr=0_

Line 19: Velocity(whichBot,vl,vr)
-----
Line 20: end Attack1
```

```

Line 21: on Attack2(whichBot)
Line 22: vl=0
Line 23: vr=0
Line 24: Velocity(whichBot,vl,vr)
-----
Line 25: end Attack2

Line 26: on Defend1(whichBot)
Line 27: vl=0
Line 28: vr=0_

Line 29: Velocity(whichBot,vl,vr)
-----
Line 30: end Defend1

Line 31: on Defend2(whichBot)_
Line 32: vl=0
Line 33: vr=0

Line 34: Velocity(whichBot,vl,vr)
-----
Line 35: end Defend2

```

样本程序详细说明

以上代码的每行详细说明如下：

```
Global B1,B2,B3,B4,B5,Ball
```

这些全局变量可以认为是从视觉系统传过来的机器人及球的位姿信息。B1 - B5 包括了蓝队每个机器人的位置和角度坐标值。Y1 - Y5 包括了黄队每个机器人的位置和角度坐标值。全局变量

“Ball”只包含了球的位置坐标值。根据 Lingo 过程在决策教本程序的顶端声明这些全局变量。

可以用 b1.pos.x 或 b1.pos.y 参考机器人的位置。

```
Global FTop,FBot,FRightX
```

```
Global FLeftX,GTopY,GbotY
```

这些全局变量表示一些常量值。可以

Ftop 表示场地上边墙的坐标 Fbot 表示场地下边墙的坐标 ,FRightX 表示场地右边墙的坐标 ,FleftX

表示场地左边墙的坐标 ,GtopY 表示小禁区上边墙的 y 坐标 ,GbotY 表示小禁区下边墙的 y 坐标。

```
on strategyY
```

启动这个句柄，决策程序一秒种自动调用机器人足球仿真平台 60 次。该句柄调用自定义函数控制整个决策过程。以下提供了一些自定义函数例子。

```
Goalie(B1)
```

```
Attack1(B2)
```

```
Attack2(B3)
```

```
Defend1(B4)
```

```
Defend2(B5)
```

以上五个自定义函数每个控制一个机器人队员的一种动作。自定义这些函数时不必取同样的函数名。可以在“on strategyY”或“on strategyB”调用这些函数。括弧里的数字(B1, B2, B3, B4, B5)表示这些函数控制的是哪个机器人。这些数字能通过变量“whichbot”的形式传送到“velocity”结构。

```
on strategyY
```

在决策程序中，必须调用这个函数。机器人足球仿真平台通过这个钩子读并且理解决策过程。作为黄队策略时，采用“on strategyY”的形式；作为蓝队策略时，采用“on strategB”的形式。注意：如果这个函数没有包含在内，决策程序不会运行。

```
on Goalie(whichBot)
```

```
vl=0
```

```
vr=0
```

这是一个自定义守门员的样本函数。WhichBot 变量表示指定的哪个机器人。可以给 vl 或 vr 变量赋 0~125 之间的一个值。上例中，如果 vl=125，vr=125，那么守门员机器人将以最大值前进。如果希望守门员在某种特殊情况下做特定动作，应该在 Goalie 函数中自定义下一层函数来执行要求动作。

```
Velocity(whichBot,vl,vr)
```

必须在每个自定义函数中包含该函数。它的作用是将 whichBot 指定的机器人的左右轮速度值限定在一定范围内。

```
end Goalie
```

这是自定义函数 Goalie 的结尾句。

```
on Attack1(whichBot)
```

```
v1=0
```

```
vr=0
```

这是自定义进攻函数的模板。和 Goalie 函数相似，也是通过控制左右轮来控制小车。当 $v1 = 50$ ， $vr = 30$ 时，进攻的机器人能以中速转圈。如果希望在特定情况下对进攻机器人小车的速度和方向做特殊控制，那么应该将下一层的自定义函数在该函数中调用。

```
Velocity(whichBot,v1,vr)
```

和 Goalie 函数同理。

既然一个策略脚本程序的基本特性已经描述清楚了，那么就可以通过编写决策脚本程序来实现自定义的函数功能，控制机器人的运动。

附录二：

5 对 5 比赛规则

规则 1：场地及比赛用球

（a）场地尺寸

比赛场地为黑色无反光的木制长方形台面，长宽为 220cm X 180cm，周边为 5cm 高，2.5cm 宽的边墙。边墙顶面应为黑色，侧面应漆为白色，场地四个边角固定有 7cm X 7cm 的实心等腰直角三角块，以避免进入边角。台面材质应与乒乓球台面材质相同。

（b）场地标志（附图 1）

场地上的标志如附图 1 所示，中心圆半径为 25cm。

罚球区的弧沿球门线方向宽为 25cm，垂直球门线方向的宽为 5cm。

主线条及弧线，如中心线、球门区边线以及中心圈等，应为宽为 3mm 的白色线条。各争球点（规则 13）的机器人放置点应用灰色标示。

（c）球门

球门宽 40cm，无横梁和球网。

（d）球门线和球门区

球门线在球门的前缘，宽 40cm。

球门前 50cm X 15cm 的方形区域称之为球门区。

（e）禁区

禁区包括球门前 80cm X 35cm 的方形区域内除去球门区的部分，以及方形区域外相邻的弧（沿球门线方向 25cm 宽，垂直球门线方向 5cm 宽）。

（f）球

以橘红色高尔夫球为比赛用球，直径 42.7mm，重 46 克。

（g）球场位置

场地位于室内。

（h）照明条件

比赛现场的照明应固定在 1000 勒克斯左右。

规则 2：选手

（a）总体系统（附图 2）

比赛在两个队之间进行，各队有 5 个机器人。各队可以有一个机器人作为守门员（规则 2.b.2）。球队包括三个人，分别为“领队”、“教练”、“训练员”，他们只能留在看台上。各队可以使用一台主机，主要用于视觉处理和定位。

（b）机器人

1. 机器人的尺寸限定在 7.5cm X 7.5cm X 7.5cm，通讯用天线不计在尺寸限定内。

I. 机器人的顶面不能是橘红色。由赛事组织者分配蓝色或黄色贴片给各队机器人，用作不同参赛队的队标。所有机器人的蓝色或黄色队标应该至少有一个不小于 3.5cm X 3.5cm 的可见的实心区域位于机器人的顶面。一支队的队标在不同场比赛中会有变化，所以各队的队标贴片应该是可拆卸的。一旦分配了蓝色或黄色队标，机器人不能有与对手队标颜色相近的可见贴片。

注意：为识别机器人个体，推荐各队除蓝色和黄色外，最好准备至少 10 种不同颜色的贴片。

II. 为能够进行红外检测，除机器人上必要的功能区，如传感器、轮子、抓球机构外，机器人的周边应该为浅色。机器人应着队服，其尺寸限制在 8cm X 8cm X 8cm。

2. 在己方球门区（规则 1.d）的机器人应视为守门员。守门员只有在己方的门区和禁区才能抓球或持球。
3. 每个机器人应该是完全独立的，自带电源和驱动装置。主机和机器人之间的各种联系只能通过无线通讯来完成。
4. 允许机器人装备手臂和腿等，但是这些附肢即使在完全伸展的情况下，也要满足尺寸限制（规则 2.b.1）。无论从顶部或者从侧面看，除守门员外的其他机器人不能抓球或持球超过球体的 30%（附图 3）。
5. 比赛进行时，任何时候裁判员一吹哨，操作员应通过主机和机器人之间的通讯来停止所有的机器人。

（c）换人

一场比赛在进行中只允许两次换人，但在中场不受此限制。当比赛正进行时，如果需要换人，相关队的领队应向裁判申请“暂停”，裁判会在适当时候停止比赛。当所有机器人和球摆放回暂停前所在位置后，比赛重新开始。

(d) 暂停

操作员可向裁判申请“暂停”。各队可以申请两次暂停，每次为 2 分钟。

规则 3：可传送的信息

领队、教练员或训练员可以通过主机向他们的机器人直接发送一定指令。未经裁判允许，不允许向某个或全体机器人发送复位或者重新开始的信号。其他任何信息，诸如比赛策略等，只能在比赛停止时才能发送给机器人。在任何情况下，操作员不能直接通过操纵杆或键盘控制机器人的行为。比赛进行时，主机可以自动发送任何信息。

规则 4：视觉系统

各队可以使用视觉系统辩识在场地上的机器人和球。摄像头或传感器的位置应限制在己方包括中线在内的半场的上方，这样在中场交换场地时无需移动摄像头。如果两队都要求将摄像头设置在场地中心圈的正上方，两摄像头应并排安放，距中心线等距且尽量靠近。悬置的摄像头或传感器放置高度应不小于 2m。

规则 5：比赛时间

1. 比赛时间为上下半场各 5 分钟，中场间隔为 10 分钟。在换人、移除受伤机器人、暂停或其他必要情况下，官方计时员将暂停计时。
2. 如果某队在中场休息后没有准备好继续比赛，将追加的 5 分钟的准备时间。如果在追加时间后该队仍无法继续比赛，将丧失比赛资格。

规则 6：比赛开始

1. 比赛开始前，队标和开球权通过掷币决定。掷币获胜的一方有权优先选择队标或者开球权。有开球权的一方有权选择载波频率。

2. 比赛开始时，进攻方可以将机器人放在中心圈及己方半场的任何位置。防守方可以把机器人放在己方半场除中心圈区域外的任何位置。

在上下半场开始以及进球之后，球应该放在中心圈内，开球方应该首先将球踢向己方。裁判哨声响后，比赛随即开始，所有机器人可以自由运动。

3. 比赛开始或进球得分后，比赛应该开始或继续，机器人的站位如规则 6.2 所示。

4. 半场后，双方应交换场地。

规则 7：记分方法

(a) 胜者

只有当球全部越过球门线才能被视为进球。比赛的胜负由双方进球数决定。

(b) 平局处理

如果下半场结束时出现平局，将采用突然死亡法决定胜负。加时赛在下半场结束 5 分钟后开始，加时赛最长为 3 分钟。最先进球的队为胜者。如果经过 3 分钟加时赛后仍为平局，则通过互射点球决出胜负。各方有 3 次射点球的机会，与规则 11 不同的是，场地上只能有一个射门机器人和一个守门员。守门员只能摆在球门区内，射门机器人和球的摆放同规则 11。裁判哨响后，守门员可以冲出球门区。三次互射点球后如果仍为平局，双方交替追加点球，直到决出胜者。所有点球由一个机器人主射，裁判哨响后方能射门。当出现下列情况中任何一种时，视为完成一次点球：

1. 当守门员用附肢抓住球。
2. 球滚出门区。
3. 裁判哨声响后 30 秒。

规则 8：犯规

下列情况将视为犯规：

1. 有意或无意冲撞对方：如果这种冲撞直接影响比赛的进行或是可能损坏对方机器人，裁判有权判犯规。如果防守方有意推撞对方机器人，进攻方将获得任意球。比赛中如果进攻机器人碰到球，允许机器人将球和对方机器人一起向后推。
2. 如果球在进攻机器人和守门员之间，允许进攻机器人在球门区内推撞守门员。但不能将守门员连同球一起推入球门。如果发生上述情况或进攻机器人直接推撞守门员，裁判将视之为冲撞守门员并判罚点球。
3. 进攻方有超过一个队员在对方球门区，则判防守方发门球。裁判认定机器人 50% 车体进入球门区即认定机器人已进入球门区。
4. 防守方有超过一个的机器人在己方球门区，将被判罚点球。（机器人 50% 以上的车体进入球门区即被视为机器人进入球门区。）但如果在门区内多出的机器人并不是为了防守或不直接影响比赛的进行，则不属犯规。这种例外由裁判判定。
5. 如果裁判认定某个非守门员的机器人抓住球，则认为是手球。同样，如果某个机器人将球紧紧附着在其上以至于其他机器人无法控球，也将判该机器人手球。
6. 守门员应该在 10 秒内将球踢出禁区，否则将判给对方一个点球。
7. 进攻方故意在球门区阻挡守门员将判防守方发球门球。

8. 只有裁判和双方各一名队员（领队、教练或训练员）可以接触机器人。未经裁判允许触碰机器人将被判罚点球。

9. 禁区内超过三个机器人防守将被判罚点球。（机器人超过 50% 的车体在禁区内即视为进去禁区。）

规则 9：比赛中断

出现下列情况时将中断比赛并重新摆放机器人：

1. 必须更换机器人。
2. 机器人翻倒挡住了球门。
3. 进球或犯规。
4. 裁判判发球门球（规则 12）或争球（规则 13）。

规则 10：任意球（附图 4）

如果防守方有意冲撞对方机器人，对方将获得任意球。球摆放在球场上相应的罚球点（kick position）（附图 1）。罚球机器人摆放在球后。进攻方可以任意摆放机器人。防守方的两个机器人应贴着球门区前沿线的两端摆放，另两个机器人沿禁区两侧边线摆放。裁判哨声响后所有机器人才能自由运动。

规则 11：点球（附图 5）

在下列情况下应判点球：

1. 球门区防守机器人超过两名（规则 8.4）。
2. 守门员没能在 10 秒钟内将球踢出球门区（规则 8.6）。
3. 在比赛进行中，任何队员在未经裁判允许的情况下触碰机器人（规则 8.8）。
4. 禁区防守的机器人超过三名（规则 8.9）。

当裁判判罚点球时，球应该放在场上相应的罚球点，罚球机器人放在球后。防守方守门员必须有一边接触球门线。守门员可以朝向任何角度。两队的其他机器人必须放置在中线的另一侧，但攻方可以优先摆放机器人。裁判吹哨后，比赛正常进行，即所有机器人都可以自由运动。罚球机器人可以射门或带球。

规则 12：球门球（附图 6）

发生下列情况时判球门球：

1. 如果进攻方在球门区推撞对方守门员，裁判应视之为冲撞守门员并判发球门球（规则 8.2）。

2. 进攻方有超过两个机器人攻入对方球门区，应判对方发球门球（规则 8.3）。
3. 对方机器人有意在门区阻挡守门员（规则 8.7）。
4. 守门员在自己的禁区用附肢抓住球。
5. 如果在球门区发生僵持且持续超过 10 秒。

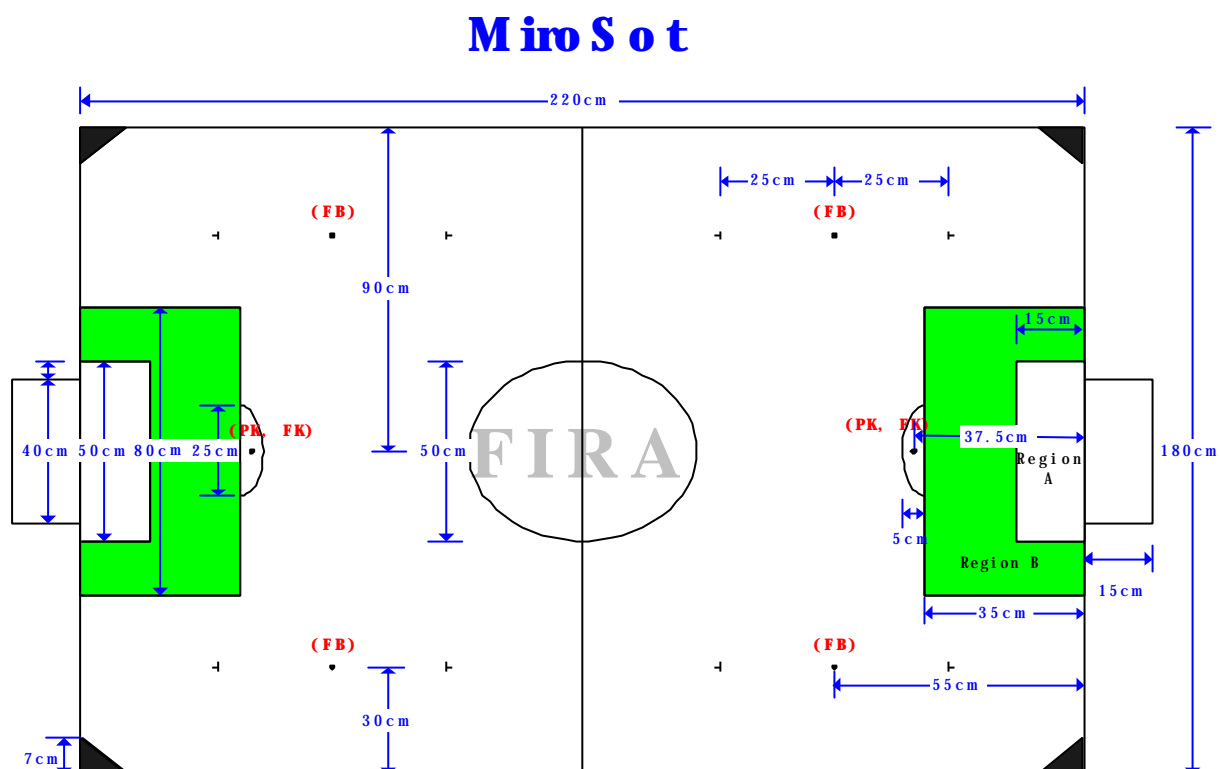
发球门球时只有守门员能摆放在球门区内，球可以摆放在门区的任一位置。本队其他机器人应摆放在球门区外。攻方有权优先摆放机器人，机器人可以摆放在场内任意位置，但必须遵守规则 8.3。防守方可以将其机器人摆放在己方半场。裁判一声哨响，比赛随即重新开始。

规则 13：争球（附图 7）

在球门区外发生僵持且持续时间超过 10 秒，则判争球。

若争球发生在场地的某一四分之一区域内，球应放置在该区域相应的争球点（附图 1）。两队各有一个机器人摆放在球两侧沿场地纵向且距球 25cm 处。两队其他机器人必须放置在该四分之一区域外。防守方有权优先摆放机器人。裁判吹哨后比赛继续，所有机器人可以自由运动。

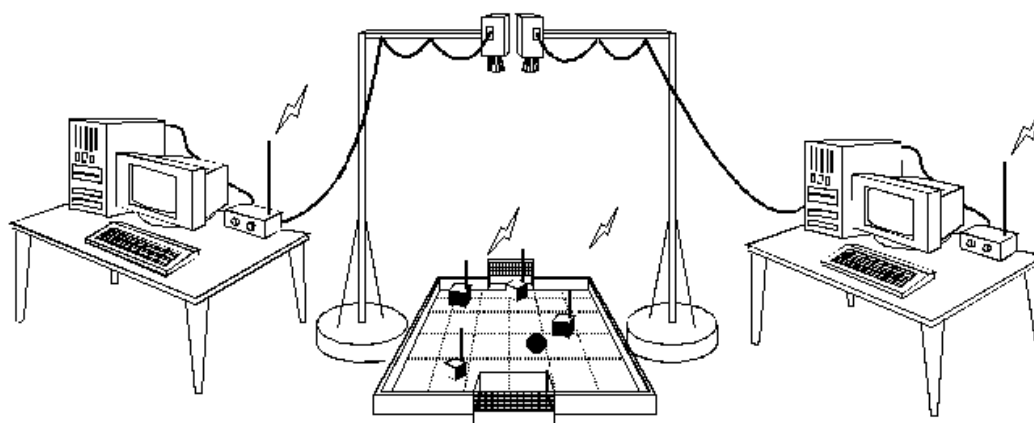
[附图 1]



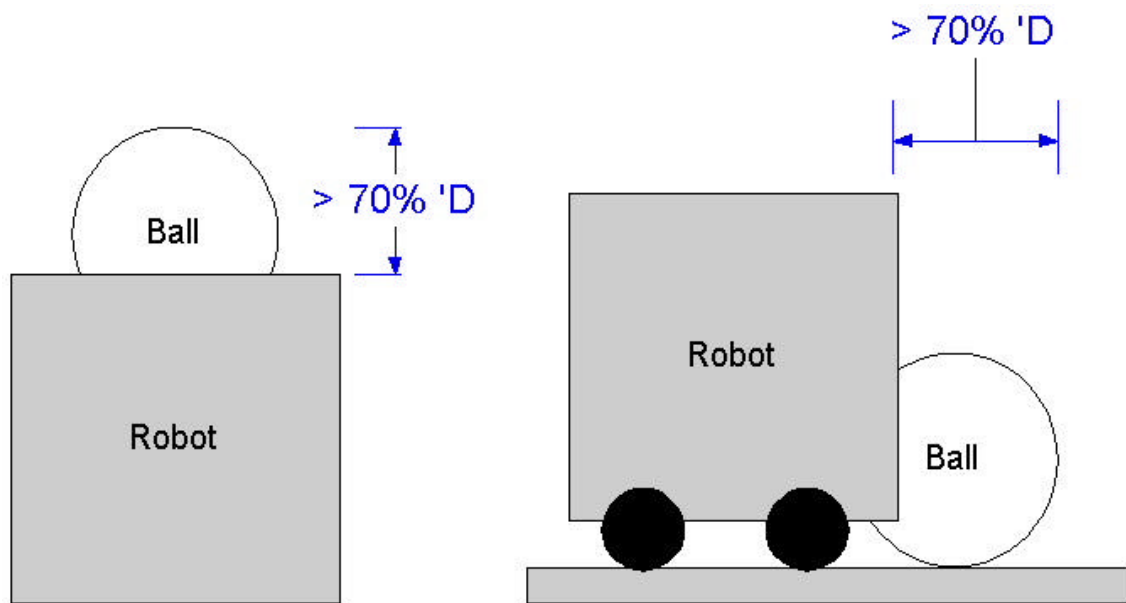
[附图 2]

Appendix 2

Overall system



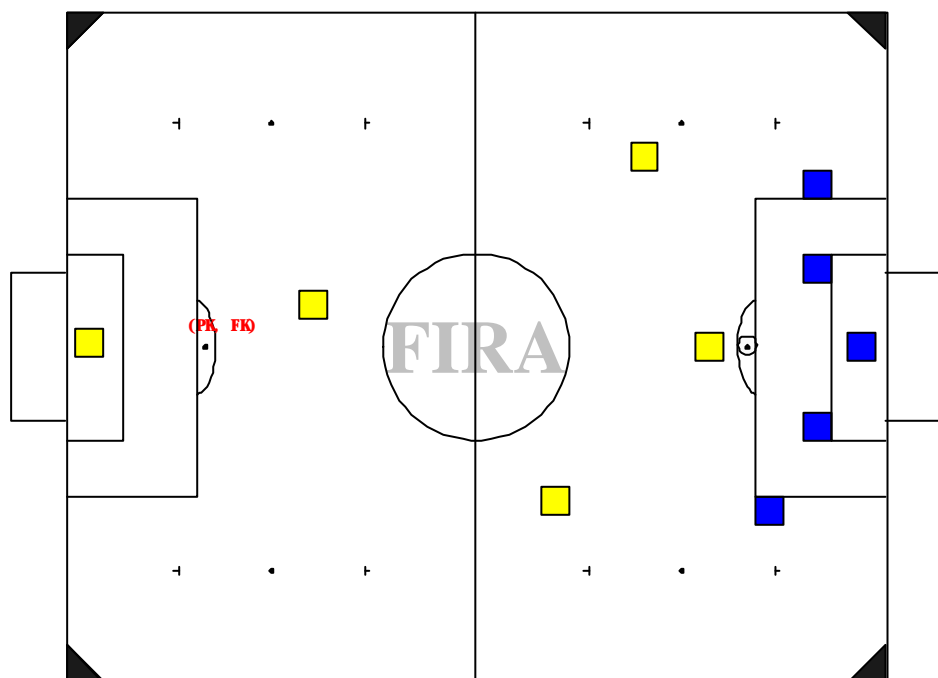
[附图 3]



[附图 4]

Free-Kick

Middle League MiroSot



Free-Kick situation:

1. defender robot intentionally pushes an opponent robot

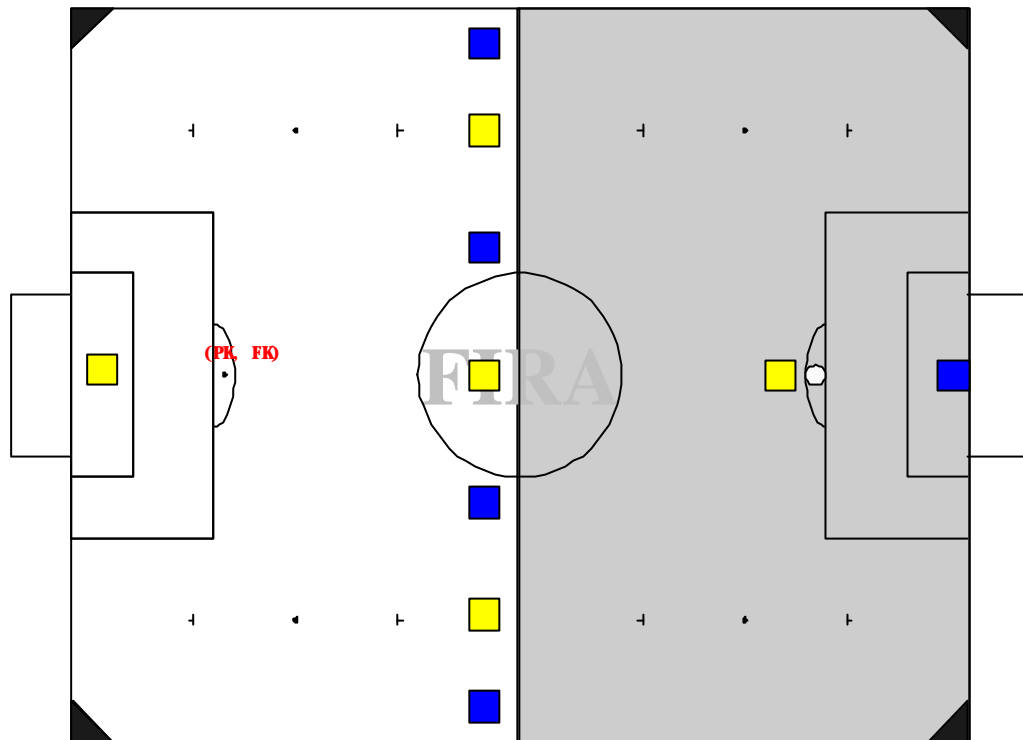
Robots and ball positions:

1. robot taking the kick behind the ball
2. attacking team can position its robots freely within its own side
3. defending two robots in touch with the front line of the goal area and the other two robots in touch with the side line of the penalty area
4. the defending team should position their robots first

[附图 5]

Penalty - Kick

Middle League MiroSot



Penalty-Kick situation:

1. defending with more one robot in the goal area
2. goalkeeper fails to kick out the ball from goal area within 10 seconds
3. human operators touch the robots without the referee's permission
4. defending with more three robots in the penalty area

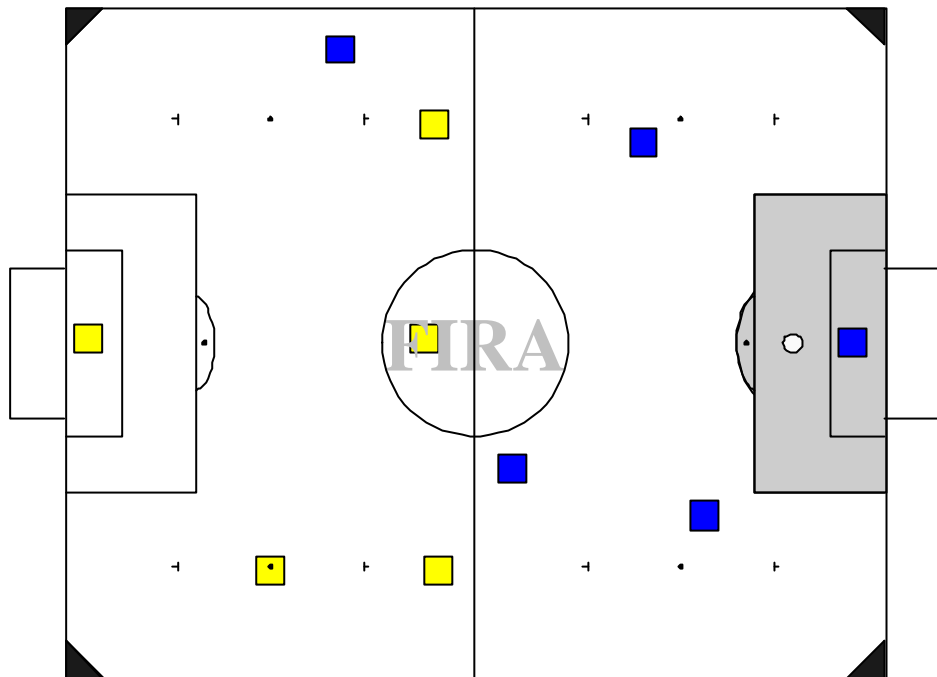
Robots and ball positions:

1. robot taking the kick behind the ball
2. defending goalkeeper should be in touch with the goal line
3. all other robots of both teams on the other half of the playground
4. the defending team should position their robots first

[附图 6]

Goal Kick

Middle League MiroSot



Goal-Kick situation:

1. an attacking robot pushes the goalkeeper in its goal area
2. attacking with more than two robots in opposite goal area
3. opponent robot intentionally blocks the goal keeper
4. goal keeper catches the ball in its goal area with its appendages (if any)
5. stalemate in goal area for 10 seconds

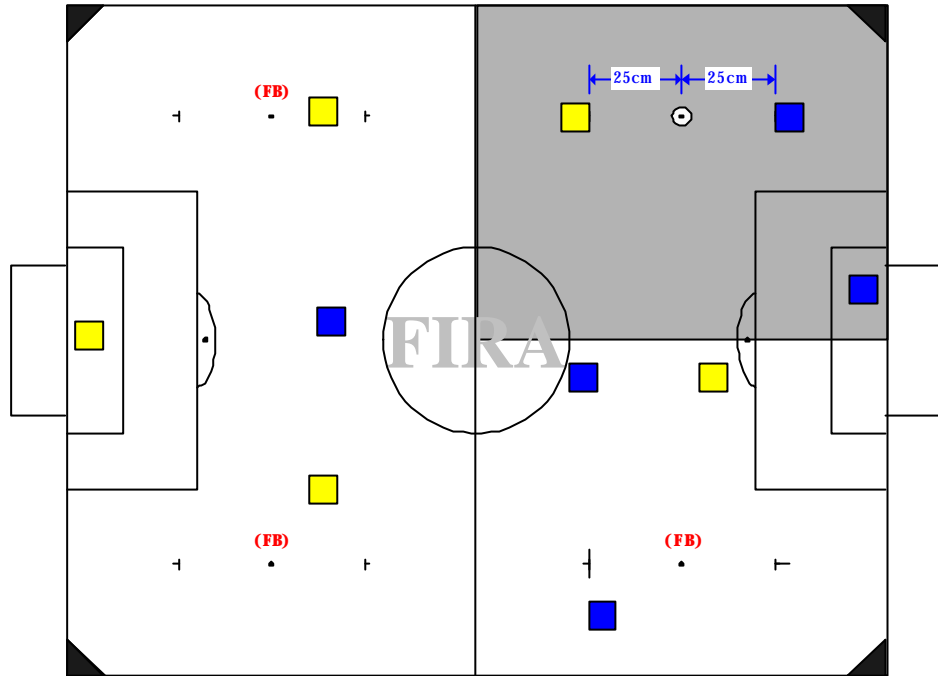
Robots and ball positions:

1. only the goal keeper allowed in the goal area
2. ball can be placed anywhere inside the goal area
3. the defending team should position their robots first

[附图 7]

Free - Ball

Middle League MiroSot



Free-Ball situation:

1. stalemate outside goal area for 10 seconds

Robots and ball position:

1. one robot per team 25 cm apart on either side of the ball (horizontal direction)
2. other robots of both teams outside the quarter where Free-Ball is being called
3. the defending team should position their robots first