

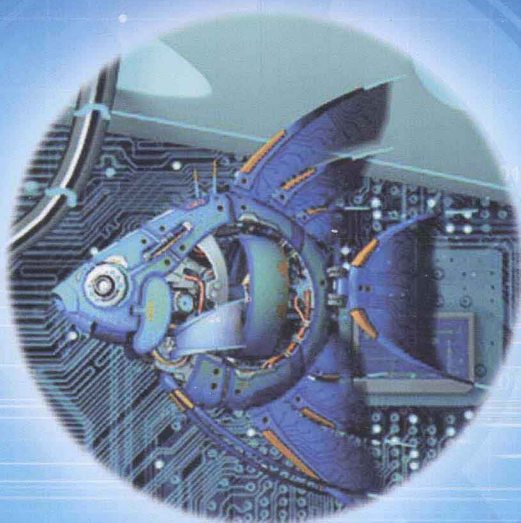
水中机器人（机器鱼）教育2D仿真系列教材

Underwater Robot (Robotic Fish) Technology Textbook Series: Simulation Technology

多机器鱼协作仿真系统

◎ 编著 谢广明 李淑琴 何宸光

Robot



HEUP

哈尔滨工程大学出版社

水中机器人(机器鱼)教育 2D 仿真系列教材

多机器鱼协作仿真系统

编著 谢广明 李淑琴 何宸光

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

多机器鱼协作仿真系统是中国素质体育机器人运动会水中专项 2D 仿真组竞赛项目所指定的软件平台。本书全面系统地介绍了多机器鱼协作仿真系统的设计模型、实现原理以及使用方法等问题。全书共 8 章。第 1 章绪论；第 2 章介绍仿真系统的总体设计；第 3 章介绍仿真系统的实现过程；第 4 章介绍仿真系统中碰撞检测的方法和效果；第 5 章介绍仿真机器鱼的伪 3D 绘制；第 6 章介绍仿真障碍物的设计与实现；第 7 章介绍仿真系统应用；第 8 章为总结与展望。本书适用于参加中国素质体育机器人运动会水中专项运动全局视觉组竞赛项目的所有教练员、裁判员和运动员教学使用，也适合机器人爱好者学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水中机器人 (机器鱼) 教育 2D 仿真系列教材. 多机器鱼协作仿真系统/谢广明, 李淑琴, 何宸光编著. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0611 - 7

I. ①水… II. ①谢… ②李… ③何… III. ①海洋机器人 - 仿真系统 - 竞赛 - 教材 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 148166 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 9
字 数 147 千字
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元
[http: //www. hrbeupress. com](http://www.hrbeupress.com)
E-mail: heupress@hrbeu. edu. cn

利國利民 造福子孫

功在當代 利在千秋

水中机器人(机器鱼)教育 2D 仿真系列教材

编审委员会

编委会主任：何宸光

编 委 会：晓 敏 韩立群 冀运熙 张 怡
邢小泉 秦吉宏 白 洁 乔 雷
滕兆勇

前言

江泽民同志指出：科学技术是第一生产力。振兴经济首先要振兴科技。只有坚定地推进科技进步，才能在激烈的竞争中取得主动。当前，我国经济正面临着加速发展、调整结构、提高效益的重大任务，尤其需要全社会提高科技意识，多方面增加科技投入，真正依靠科技进步。科技工作要面向经济建设主战场，在开发研究、高新技术及其产业、基础性研究这三个方面合理配置力量，确定各自攀登高峰的目标。在世界高科技领域中，中华民族要占有应有的位置。通过深化改革，建立和完善科技与经济有效结合的机制，加速科技成果的商品化和向现实生产力转化。不断完善保护知识产权的制度。认真抓好引进先进技术的消化、吸收和创新。努力提高科技进步在经济增长中所占的含量，促进整个经济由粗放经营向集约经营转变。

众所周知，文化是一个民族的实力，教育是一个民族的生机，体育是一个民族的国力。社会变革是极其巨大的，正是这极其巨大的变革迫使人们去认识新事物，迎接新挑战，迫使人们去思考许许多多前所未有的东西。服务机器人作为新生事物，已经走进人类，人类已经走进机器人时代。机器人技术涵盖了人类所有的学科知识和自然科学知识，特别是智能机器人和服务机器人，与人们的生产生活密不可分。2012 年国家科技部组织编制了《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，《规划》中明确了服务机器人技术是集机械、信息、材料、生物医学等多学科交叉的战略性高技术，对于相关技术与产业的发展起着重要的支撑和引领作用。在全国范围内实施《服务机器人科技发展“十二五”专项规划》，实现机器人技术作为战略高技术，推动国防军事、智能制造装备、资源开发，发展未来服务机器人产业，有望培育新的战略性新兴产业，而且具有很强的技术辐射性与带动性，对促进智能制造装备发展、提高应急处理突发事件能力、发展医疗康复设备、增强军事国防实力等都具有十分重要的现实意义。

2011 年，国家体育总局与神州通信集团战略合作，共同调研机器人运动

的国际和国内现状，在美国、日本、欧洲国家等发达国家，机器人教育教学已被纳入中小学的必修课，有些大学还专门设立了机器人学科或机器人学院；机器人体育赛事方面，国际上著名赛事均由本国军事或太空部门主办，如 AUVic 赛事由国际无人系统联合会（AUVSI）和美国海军装备研究中心联合主办，水下 SAUC-U 赛事由全球海军技术研究局主办。机器人运动在我国必须规范开展，而规范的前提是规则。国家体育总局借鉴国际机器人教育教学和机器人体育赛事的先进经验，结合国内机器人赛事的现状，根据《中华人民共和国体育法》的有关规定，将机器人运动纳入国家社会体育运动项目，定义为中国素质体育机器人运动，以彰显这项运动的本质是素质教育。

中国素质体育机器人运动受到了社会各界的广泛关注，全国政协十一届五次会议上以关于“高度重视，深入做好素质体育机器人赛事”提出提案（3427 号），国家体育总局对提案作出答复（体群字【2012】96 号）。《答复》中明确做好六项工作：一、项目的基础建设；二、组织建设；三、竞赛系统建设；四、加强对外交流；五、把握文化大发展大繁荣对素质体育机器人运动带来的新机遇、新要求；六、加强与其他部门的合作。并于 2012 年颁布施行《中国素质体育机器人运动通用竞赛规则》，为这项利国利民伟大工程的规范开展、健康开展、广泛开展打下了坚实的基础。

此次出版的机器人专项教育系列教材在我国机器人教育领域尚属首次，此系列教材的出版使我国机器人基础教育、专项教育、学历教育的全面普及有了良好的开端，为我国机器人体育事业的健康发展、积极发展起到了巨大的推动作用。

何宸光

2013 年 3 月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多机器人协作仿真系统	5
1.3 水中仿生机器人协作仿真系统	10
思考与练习题	11
第2章 仿真系统设计	12
2.1 引言	12
2.2 系统开发选型	13
2.3 功能规划	17
2.4 架构设计	19
2.5 系统比赛控制模块设计	26
思考与练习题	27
第3章 仿真系统实现	28
3.1 引言	28
3.2 以仿真任务为中心的对象模型	29
3.3 以仿真循环为主线的运行流程	32
3.4 基于实验数据的简化动力学和运动学模型	32
思考与练习题	37
第4章 碰撞检测和响应	38
4.1 引言	38
4.2 碰撞建模	38
4.3 碰撞检测	45
4.4 碰撞响应	55
4.5 碰撞模拟的实现与结果	62
思考与练习题	68

第 5 章 仿真机器鱼的伪 3D 绘制	69
5.1 问题描述	69
5.2 伪 3D 鱼体绘制方案	71
5.3 鱼体建模	78
5.4 动态坐标点计算	81
5.5 CPG 运动学模型	83
5.6 绘制技术解析	85
5.7 绘制结果对比	90
思考与练习题	91
第 6 章 仿真障碍物的设计与实现	92
6.1 仿真障碍物分类	92
6.2 静态障碍物	92
6.3 动态障碍物	93
思考与练习题	102
第 7 章 仿真系统应用	103
7.1 仿真任务开发	103
7.2 仿真策略开发	108
思考与练习题	118
第 8 章 总结与展望	119
附录 名词解释	121
参考文献	123
后记	127

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

自 1959 年美国万能自动化 (Unimation) 公司制造出第一台真正实用的工业机器人“尤尼梅特 (Unimate)”以来, 机器人技术随着人类生产生活需求的提高和相关技术的进步而不断发展。经过五十多年的发展, 从功能上看, 机器人技术已经走过两代, 进入第三代。第一代为工业机器人, 主要应用领域是工业自动化, 典型的应用场景是汽车生产线上使用机械臂自动焊接和喷涂; 主要特点是采用“示教—再现”方式重复作业, 帮助人类完成枯燥重复的操作任务。第二代为遥控机器人, 主要应用领域是宇航、海底作业、核工业等, 典型的应用场景是海洋资源勘探船上使用无人遥控潜水器潜入深海进行拍摄或取样; 主要特点是通过遥控指令进行远距离作业, 可以进入人类自身难以进入的场所完成任务。第三代为目前正雨后春笋般涌现的智能机器人, 应用领域十分广泛, 几乎各种人类不愿意亲自完成或人类亲自完成代价过高的任务, 都有人在试图研究相应的智能机器人去完成, 典型的应用场景是客人在酒店门口下车时迎宾机器人绅士般地迎上去接待客人; 主要特点是具有运动、感知、学习、适应、逻辑判断和交互能力, 可以从更多方面服务人类的生产生活。机器人技术, 无论怎么发展, 其目的离不开帮助人类探索自然、开发资源和辅助生产生活。

海洋覆盖地球面积的三分之二强, 蕴藏着丰富的生物资源和矿产资源, 对人类未来的生存有着重要的影响。世界人口的 37% 左右居住在离海洋 100 千米以内的区域。但人类竭尽全力开发陆地资源, 并尝试探测太空资源时, 海洋资源在某种程度上却有被忽视之嫌。迄今, 人类对丰富的海洋资源, 尤其是深海资源, 连探测都谈不上深入, 更不用说大规模开发。因为海洋资源的探测和开发, 比陆地资源甚至太空资源更难, 在现有技术条件下, 只能逐步探索。在海洋资源探测和有效开发利用、海洋环境保护方面, 水中机器人有着无可替代



的地位。

早期的水中机器人技术源于海洋探测和海底作业应用，即无人潜水器系统的研究，是第二代机器人技术即遥控机器人技术的重要分支。这个阶段的水中机器人主要是指无人潜水器，它又分为无人遥控潜水器（Remotely Operated Vehicle, ROV）和自治水中机器人（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）两种类型。ROV 和水面母船之间通过脐带电缆连接，脐带电缆将电力和控制信号由母船向 ROV 传输，将数据信号由 ROV 向母船传输；而 AUV 和母船之间则没有物理连接，依靠自身携带的动力和机器本身的智能自主航行。整体看来，这个阶段的水中机器人体积庞大、系统复杂、造价高昂、机动性和灵活性有限，可以称之为大中型水中机器人，主要应用于广阔的海洋，尤其是深海环境中大范围大规模作业。而在各种江河湖泊和人工水环境中，进行小范围小规模作业的需求，如水中污染物取样、水中场景图像或视频采集等，多数情况下无法使用大中型水中机器人，即使能使用，成本也太高。于是小型甚至微型水中机器人的研究应运而生。

诞生于 20 世纪 60 年代的仿生学（Bionics），是生物科学学科和工程技术学科交叉融合而形成的一门新兴学科，主要目的是通过学习、模仿、复制和再造生物系统的结构、功能、工作原理及控制机制，以改进现有的或创造新的技术装置或工艺过程。现代仿生学外延广泛，机器人学是其主要结合和应用的领域之一。

当水中机器人和仿生学相遇时，科研工作者的目光自然而然地投向了鱼类。作为自然界出现最早的脊椎动物，经过亿万年的自然选择，鱼类进化出了非凡的水中运动能力，既可在持久游速下保持低功耗、高效率，又可在拉力游速或爆发游速下实现高机动性。鱼类这种完美的水中运动本领，在吸引生物学家研究鱼类运动机理的同时，也吸引着机器人研究者模仿真鱼制造机器鱼。1994 年 MIT 成功研制出世界上第一条真正意义上的仿生金枪鱼（Robotuna），树立了机器鱼研究领域的第一块里程碑。随着机械、材料、自动控制、微电子和计算机等相关技术的发展，水中仿生机器人，尤其是机器鱼的研究渐成热点。

单个水中仿生机器人的设计制造，相对大中型水中机器人来说，成本要低很多，但作业能力也相应弱了不少；一种可能的发展途径就是研究水下多机器人系统，让多个成本较低、能力有限的小微型水中仿生机器人协作起来完成

任务。

陆地机器人领域,多机器人系统的研究从工业机器人时代就已经开始。典型的陆地多机器人系统有协作机器人系统、自重构机器人系统、群智能机器人系统及足球机器人系统等四类。中科院沈阳自动化所制造业应用多机器人装配为背景,建立了一个多机器人协作装配系统 (Multi-Robot Cooperative Assembly System, MRCAS); 日本 Nagoya 大学的 T. Fukuda 教授带领的研究小组在生物细胞结构启发下研制出一个典型的自重构机器人系统 CEBOT (CEllular roBOTic system); 美国 USC 大学开发出一个典型群智能机器人系统 The Nerd Herd; 足球机器人系统则在 RoboCup 和 FIRA 两大国际机器人竞赛推动下不断发展。

水中机器人领域,多机器人系统研究始于大中型水中机器人,尤其是 AUV 分支。1988 年,美国国家标准局机器人系统部 (Robot Systems Division, National Bureau of Standards, NBS) 就展开了对水下多机器人系统的研究,目的是制造一个具有智能、自主和协作特性的多机器人系统。1996 年,日本东京大学生产技术研究所 (Institute of Industrial Science, University of Tokyo, IIS) 以其研制的 AUV Twin-Burger 为基础构建了一个水下多机器人系统。2001 年,美国海底自治系统研究所 (Autonomous Undersea Systems Institute, AUSI) 在其研制的多种 AUV 的基础上,展开了异构 AUV 水下协同作业的研究。而小微型水下多机器人系统的研究,由于其本身的研究起步就比较晚,且研究者的目光更多地集中在单个机器人仿生特性上,因而进展不大。

在小微型水中机器人、仿生机器人和多机器人系统的结合点上,北京大学智能控制实验室 (Intelligent Control Laboratory, ICL, 作者所在实验室,以下简称 PKUICL) 设计出了一类三关节、无线控制的小型仿生机器鱼,如图 1.1 所示,并开发了一套基于全局视觉的多机器鱼协作系统,如图 1.2 所示。CCD 摄像头采集机器鱼外部状态信息和环境信息,图像通过图像采集卡输入集控主机,主机上的协作系统软件处理图像,结合无线通信模块反馈回来的机器鱼内部控制信息,作为控制和决策系统的输入,最后输出机器鱼的控制命令,通过无线通信模块发送给机器鱼,机器鱼内嵌的微控系统解析控制命令,驱动机器鱼按照指定的方式运动,实现各种协作任务。

PKUICL 在前述三个分支结合点上的研究,并不局限于机器鱼,而是设计了一系列小微型非陆地仿生机器人,包括机器鱼、机器海豚、机器海龟和机器

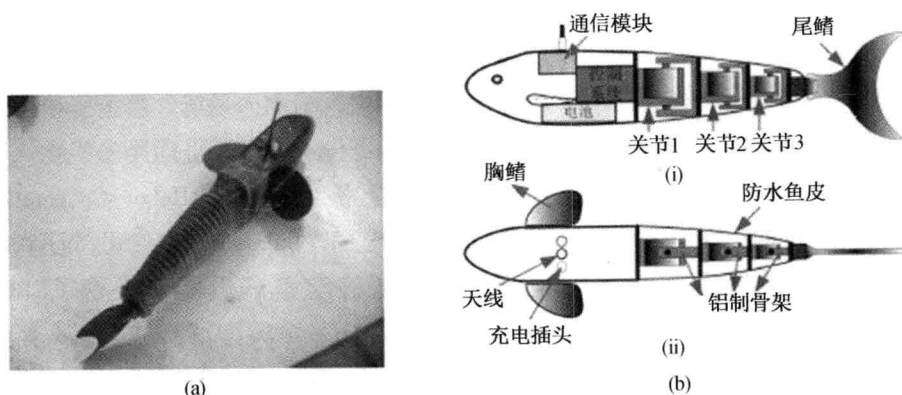


图 1.1 小型仿生机器鱼示意图

(a) 机器鱼原型；(b) 机器鱼机械结构示意图

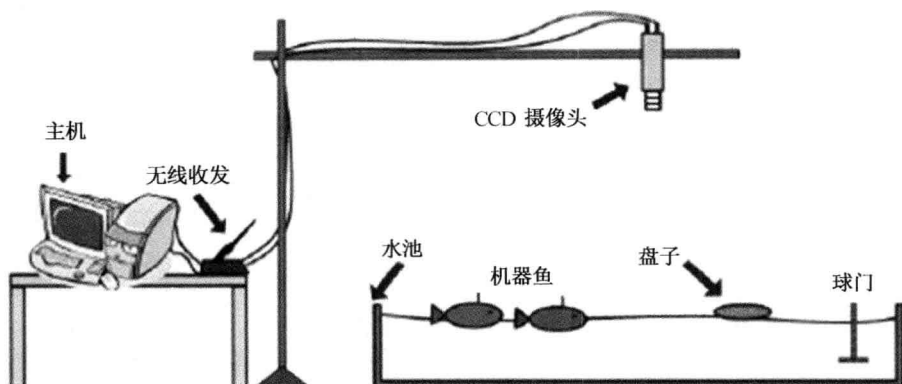


图 1.2 多仿生机器鱼协作系统硬件结构示意图

蝶螈等多个系列；再以此为基础进行多机器人相关研究；这些研究对象并不一定只工作在水底，远景目标也不仅限于水下应用，可能衍生出水面应用甚至两栖应用；因此 PKUICL 的非陆地仿生机器人可以统称为水中机器人，结合仿生特性，就是水中仿生机器人。

在文献 [20] 改进设计的基于全局视觉的多机器鱼协作系统基础上，PKUICL 于 2007 年提出机器鱼水球比赛这个多水中机器人协作标准问题，被作为第一个中国高校完全自主开发的比赛项目列为当年恰在中国苏州举行的

RoboCup 全球比赛展示项目；现在，该项目已经发展成为中国机器人大赛暨 RoboCup 中国公开赛正式项目并进行过多届比赛，在机器人科普和水中机器人研究示范方面发挥着重要作用，发展势头良好。

然而，为了将多个机器人有机组合起来完成给定任务，必须根据任务的要求设计一套行之有效的算法。算法的合理性和有效性可以通过计算机仿真进行初步验证，然后再通过实际的多机器人系统进行实验验证。如果没有仿真系统的支撑，任何一点调整都要通过实体机器人反复实验来验证，那么研究人员面对的困难便可想而知。一方面在研的实体机器人本身成熟度可能不高，一些无关紧要的因素可能对实验造成不可预知的影响。另一方面反复的实体机器人实验对研究人员的时间精力和实体机器人机械寿命及耗材消耗都很大，很可能造成人力物力的浪费。最重要的一方面是，在很多情况下，实体机器人实验因为受制于复杂的客观条件，无法（或者有办法但成本高得无法承受）有针对性地验证和测试某些值得关注的问题及其解决方案。而且，现代视景仿真技术，将仿真领域最为重视的数学模型和先进的可视化技术结合起来，通过仿真系统进行实验可以比实际实验更为直观地反映诸多基本问题，减少研究人员的工作量。因此，多机器人协作仿真系统在多机器人研究中有着不可或缺的地位。本书将从此仿真系统的发展过程、架构搭建、实现、应用等几方面详细地进行介绍。

1.2 多机器人协作仿真系统

多机器人协作是指多个机器人在完成一些集体活动时相互合作的性质。多个机器人通过协调协作，可以完成单个机器人难以完成的复杂作业；可以提高机器人系统在作业过程中的效率；可以增强机器人系统的环境适应能力；还可使多机器人系统解决更多的实际问题，拓宽应用的途径。多机器人协作是机器人技术发展的一种趋势，也是实际应用迫切要求的结果。随着机器人技术的不断发展，机器人协作已成为机器人领域研究的热门课题之一。

国内外许多研究机器人的机构，在研究过程中，均为其多机器人系统构建了相应的仿真实验环境。



1.2.1 陆地多机器人协作仿真系统

陆地机器人领域,典型的多机器人仿真系统有卡耐基梅隆大学(Carnegie Mellon University, CMU)开发的 TeamBots;美国乔治亚理工学院(Georgia Institute of Technology, GaTech)开发的 MissionLab;美国乔治梅森大学(George Mason University, GMU)开发的 MASON;日本筑波(Tsukuba)电子技术综合研究所(ElectroTechnical Laboratory, ETL)松原仁(Itsuki Noda)及后续诸多开发者共同开发和维护的 Soccer Server (rcssserver);德国科布伦次朗道大学(Koblenz Landau University, KLU)的奥利弗·奥伯斯特(Oliver Obst)和马尔科·科格勒(Marco Kogler)及后续诸多开发者共同开发和维护的 SimSpark 和 Soccer Server 3D (rcssserver3D);中国东北大学佟国峰等人开发和维护的牛牛(NewNeu)系列足球机器人仿真平台等。

1. TeamBots

TeamBots 是一套用于移动多机器人系统研究的软件,它支持多机器人控制系统的原型构造、仿真和执行;它的主要组件有仿真环境程序 TBSim、实体机器人控制系统程序 TBHard。

TeamBots 2.0 版的 TBHard 可以用于控制 Nomadic Technologies 公司生产的 Nomad 150 型机器人和 Probotic 公司生产的 Cye 型机器人。而 TeamBots 仿真环境 TBSim 最重要的特性是支持对任意 TBHard 能控制的实体机器人的原型构建和仿真,因此 TeamBots 2.0 可以仿真 Nomad 150 和 Cye 机器人,甚至可以构建这两种机器人仿真模型构成的异构多机器人仿真场景。

TBSim 仿真环境可以通过读取一个简单的配置文件来构建,在配置文件中可以指定仿真环境所包含的对象及其相关属性,这些对象可以是墙体、道路、一个或多个机器人和圆形障碍物。一个典型的仿真场景如图 1.3 所示。

TeamBots 是开源软件,可以从其官方网站 <http://www.teambots.org> 或 <http://www.cs.cmu.edu/> 下载。

2. Soccer Server 和 Soccer Server 3D

Soccer Server (rcssserver) 和 Soccer Server 3D (rcssserver3D, 包括 SimSpark) 是机器人世界杯足球锦标赛(Robot Soccer World Cup, RoboCup)的二维(2D)和三维(3D)仿真比赛项目官方比赛平台。

Rcssserver 采用客户端/服务端(Client/Server, C/S)模式。服务端模拟

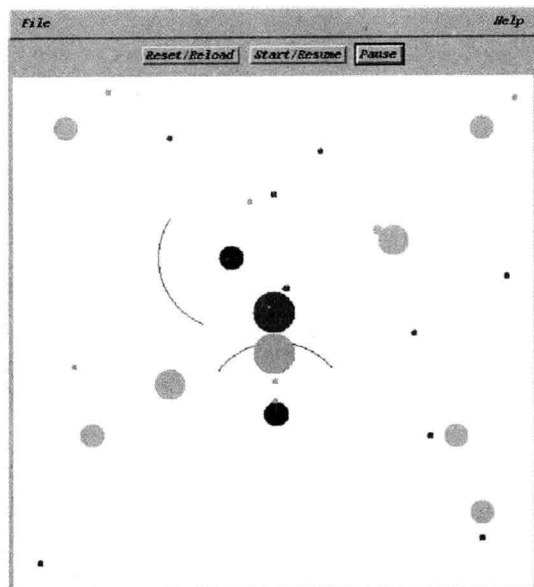


图 1.3 TeamBots 仿真场景图

一片虚拟的二维足球场、控制比赛过程并处理各客户端进程之间的通信，主要由三大模块构成，分别是场地模拟模块、裁判模块和消息交互模块。客户端模拟单个足球机器人，但其物理模型（包括位置、速度、加速度等物理属性）和几何模型（包括形状、尺寸、颜色等外观属性，事实上 Rcserver 的形状一直都是非常简单的圆形，圆形内填充不同的颜色和数字编号用以指示机器人的方向和区分不同的机器人）由服务端模拟，本质上客户端只是模拟实体机器人的控制系统。客户端由参赛队伍根据服务器端给出的控制接口和通信协议进行编写。

客户端和服务端之间采用 UDP/IP 协议进行通信。比赛时，由启动的服务器端进程确定每支队伍的机器人数量（一般为 11），然后每支队伍都启动该数量的客户端进程，每个客户端进程第一次连接到服务器端进程时，会被分配一个仿真机器人。随后，各客户端模拟的机器人控制系统通过向服务器端发送控制命令的方式控制该仿真机器人进行比赛。

Rcserver 服务器端运行界面如图 1.4 所示。

Rcserver3D 总体架构与 Rcserver 基本一致，采用 C/S 模式，服务端模

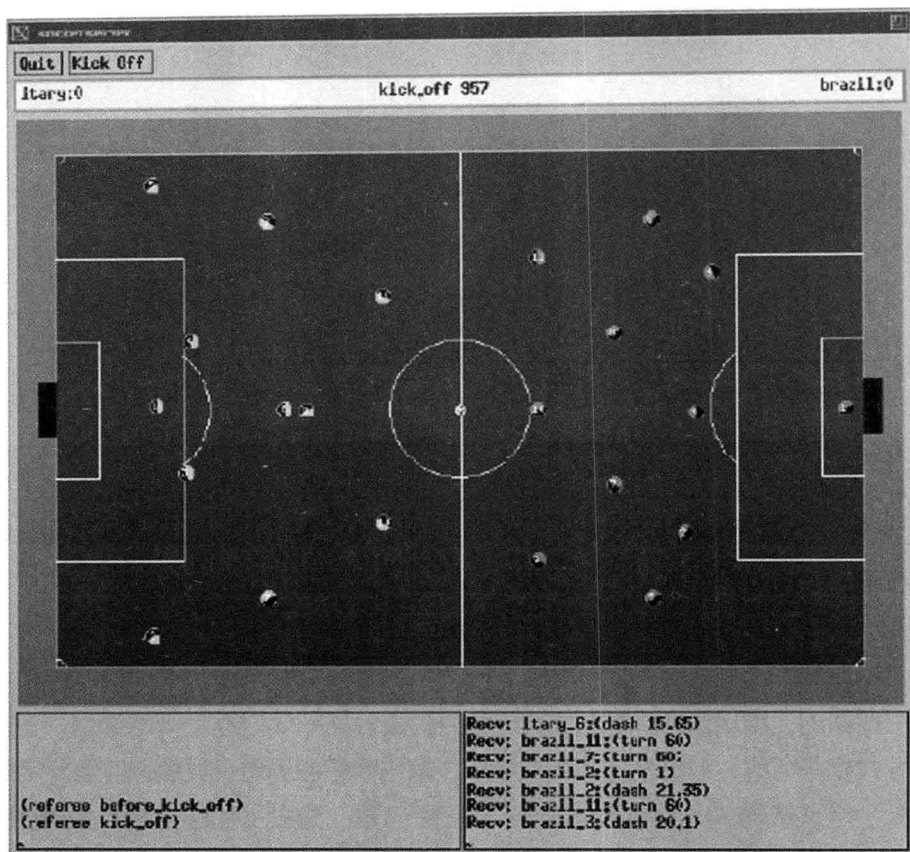


图 1.4 Rcserver 服务器端运行界面图

拟仿真环境、控制仿真过程并负责客户端间的通信；客户端需要参赛队伍编写，用以模拟单个足球机器人的控制系统，控制服务端模拟出来的足球机器人。最根本的不同在于 Rcserver3D 构建了一个 3D 仿真物理引擎 SimSpark，可以非常灵活地配置和处理仿真足球机器人的物理和几何属性及仿真环境，并以更加直观的 3D 方式呈现。Rcserver3D 因此获得极大的可扩展性，仿真足球机器人由早期的只具有简单物理和几何属性的球形，到具有比较复杂的物理和几何属性的小车形，再发展到具有高度复杂的物理和几何属性，并且支持较为复杂的传感器仿真的类人形。

Rcserver 服务器端运行界面如图 1.5 所示。