

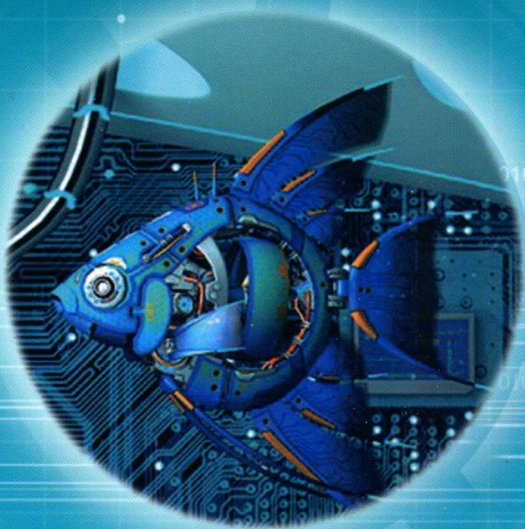
水中机器人（机器鱼）教育全局视觉系列教材

Underwater Robot (Robotic Fish) Technology Textbook Series: Global Vision League

多机器鱼协作系统

◎ 编著 谢广明 何宸光

Robot



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

013058765

TP242.2

23

水中机器人（机器鱼）教育全局视觉系列教材

多机器鱼协作系统

编著 谢广明 何宸光



HEUP 哈尔滨工程大学出版社



北航

C1669619

TP242.2
23

内 容 简 介

多机器鱼系统是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所指定的标准竞赛器械和软件、硬件系统。本书全面系统地介绍了多机器鱼协作系统的整体结构、机械结构、硬件系统、运动控制与优化等内容。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,也适合机器人爱好者参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材.
多机器鱼协作系统/谢广明,何宸光编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-5661-0615-5

I. ①水… II. ①谢… ②何… III. ①海洋机器人-
竞赛-教材 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 148169 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 7
字 数 94 千字
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
定 价 20.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

013358765

TP242.2

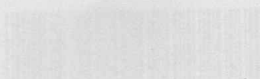
23

水中机器人（机器鱼）教育全局视觉系列教材

利国利民 造福子孙

功在当代 利在千秋

中国水利水电出版社



北京

013358765

水中机器人(机器鱼)教育全局视觉系列教材

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 多水下机器人协作系统研究背景	1
1.1 多机器人系统研究概述	1
1.2 多水下机器人系统概述	7
思考与习题	9
参考文献	9
第2章 多水下机器人协作系统总体设计	10
2.1 多水下机器人协作系统总体要求	10
2.2 多水下机器人协作系统结构	11
思考与习题	12
参考文献	12
第3章 多水下机器人协作系统硬件结构	13
第4章 多水下机器人协作系统软件结构	16
4.1 用户界面模块	17
4.2 协作控制模块	21
思考与习题	25
参考文献	25
第5章 基于灰度相关的模板匹配理论	26
5.1 模板匹配算法简述	26
5.2 模板匹配算法的性能评估	27
5.3 算法的一般流程	28
5.4 相关曲面分析	29
5.5 算法计算过程中的误差分析	32
5.6 选择面向多机器鱼的跟踪模板	33
本章小结	33

思考与习题	33
第 6 章 基于模板匹配的多机器鱼跟踪算法设计	34
6.1 水池全景环境中的背景建模	34
6.2 机器鱼模板设计	41
6.3 基于模板匹配的跟踪	43
6.4 算法流程图	44
6.5 面向多机器鱼的跟踪实现	45
本章小结	48
思考与习题	49
第 7 章 多水下机器人协作系统位姿计算	50
7.1 机器鱼的位置	50
7.2 机器鱼的方向	51
7.3 机器鱼的线速度	52
7.4 机器鱼的加速度	53
思考与习题	53
第 8 章 多水下机器人协作系统应用实例	54
8.1 多水下机器人水球比赛	55
8.2 基于状态 - 动作选择的协作推盘子	58
8.3 多仿生机器鱼协作运输系统的开发与实现	60
8.4 基于流场的多机器鱼队形控制研究	61
8.5 对抗环境下多仿生机器鱼协作爆破	62
思考与习题	63
参考文献	64
第 9 章 多水下机器人协作系统实验平台	65
9.1 系统实验平台场地	65
9.2 系统实验平台所需设备	66
9.3 系统实验平台设备的安装及拆除	67
第 10 章 多水下机器人协作控制系统软件使用说明	73
10.1 MURobotSys 运行流程	73

10.2 MURobotSys 操作说明	74
第 11 章 多水下机器人协作系统常见问题	90
11.1 串口相关	90
11.2 系统运行相关	90
附录 名词解释	91
后记	93

随着科学技术的不断发展, 机器人技术得到了极大的发展, 机器人的能力、应用范围等都有了很大的提升。但更面对一些复杂任务, 例如搬运、装配、焊接等, 单个机器人则很难以胜任。为了更有效地完成这些任务, 人们开始将多个机器人、能力更强的机器人组合起来, 通过分工合作来完成工作。通过多个机器人之间的协同工作来完成复杂任务, 是机器人技术的重要应用需求之一。

1.1 多机器人系统概述

1.1.1 多机器人系统定义

从 20 世纪 80 年代中期开始, 随着计算机技术、控制技术和通信技术的发展, 多机器人系统开始应用于工业生产、农业、军事、医疗、服务等领域。多机器人系统是指由多个机器人组成的系统, 通过分工合作来完成复杂任务。多机器人系统的研究内容包括机器人的运动控制、感知、决策、通信等方面。多机器人系统的研究对于提高生产效率、降低成本、提高系统可靠性等方面具有重要意义。

1.1.2 多机器人系统的组成

多机器人系统是由多个机器人组成的, 每个机器人都是一个独立的个体。多机器人系统的组成包括机器人本体、传感器、执行器、控制器、通信模块等。多机器人系统的研究内容包括机器人的运动控制、感知、决策、通信等方面。多机器人系统的研究对于提高生产效率、降低成本、提高系统可靠性等方面具有重要意义。

第1章 多水下机器人协作系统研究背景

最近十几年来,随着计算机技术、超大规模集成电路、控制理论、人工智能理论、传感器技术等不断成熟和发展,由多学科交叉而形成的机器人学得到了很大的发展,单个机器人的能力、鲁棒性、可靠性及效率等都有很大的提升。但是面对一些复杂的、需要提高效率的、并行完成的任务时,单个机器人则很难胜任。为了更好地解决这类问题,机器人研究者一方面开发智能更高、能力更强、柔性更好的机器人,另一方面在现有的机器人的基础上,通过多个机器人之间的协调工作来完成复杂的任务,多机器人系统便在这些新的应用需求驱动下应运而生。

1.1 多机器人系统研究概述

1.1.1 多机器人系统研究现状

从20世纪80年代中期开始,分布式人工智能和复杂系统的研究工作逐渐深入开展,多机器人系统研究全面发展。在研究过程中,学者将分布式人工智能、复杂系统、社会学、管理学等其他研究领域的理论及方法引入多机器人学的研究中,探讨机器人群体乃至机器人社会的各种组织方式、信息交互方式、进化机制等基本问题,为机器人发展提供了新的思路。其中具有代表性的多机器人系统如下。

1. 群智能机器人系统

群智能机器人系统是由许多无差别的自治机器人组成的分布式系统,它主要研究如何使能力有限的个体机器人通过交互产生群体智能。在国际上具有影响力的有:加拿大 Alberta 大学开发的 Collective Robotics 实验系统(如图 1.1 所示)、美国 USC 大学开发的 The Nerd Herd 系统(如图 1.2 所示)。

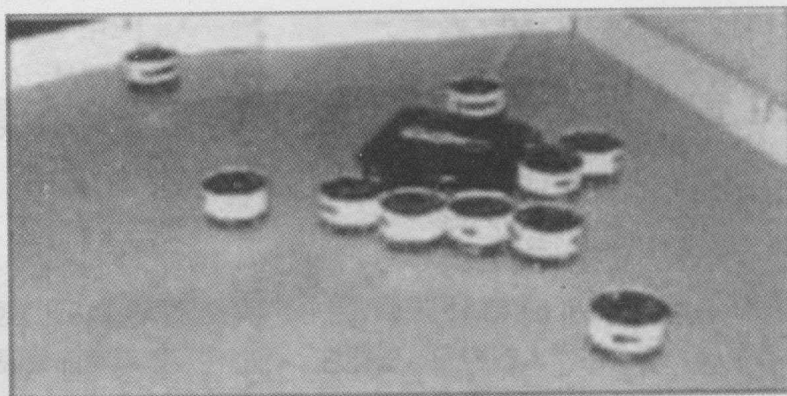


图 1.1 Collective Robotics 实验系统图

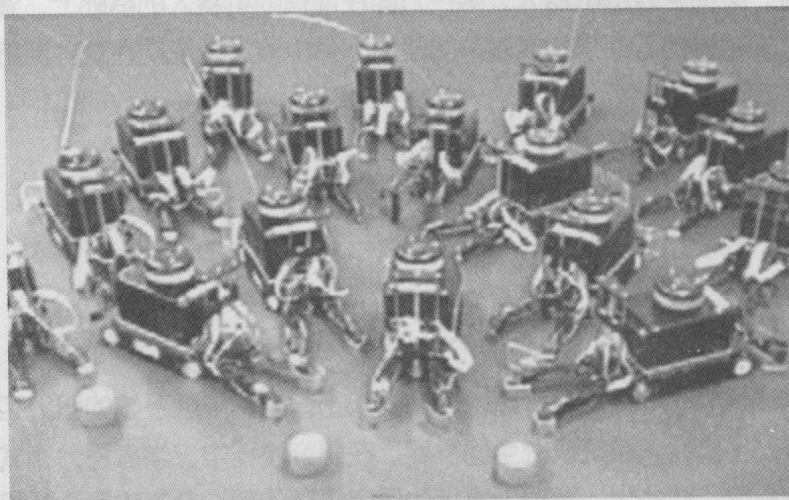


图 1.2 The Nerd Herd 实验系统图

2. 自重构机器人系统

自重构机器人系统 (Self-Reconfigurable Robotic Systems, SRRS) 以一些具有不同功能的标准模块为组件, 根据目标任务的需要, 对这些模块进行相应的组合, 进而形成具有不同功能的系统。其中 CEBOT (Cellular Robotic System) 系统 (如图 1.3 所示) 是日本 Nagoya 大学 T. Fukuda 教授在生物细胞结构的启发下研究而成的。CEBOT 系统将系统中众多相同或不同功能的机器人视为细胞元, 这些细胞元可以移动、寻找和组合。根据任务或环境的变化,

这些细胞元机器人可以自组织成器官化机器人，多个器官化机器人可以进一步自组织成功能更加复杂的机器人系统。

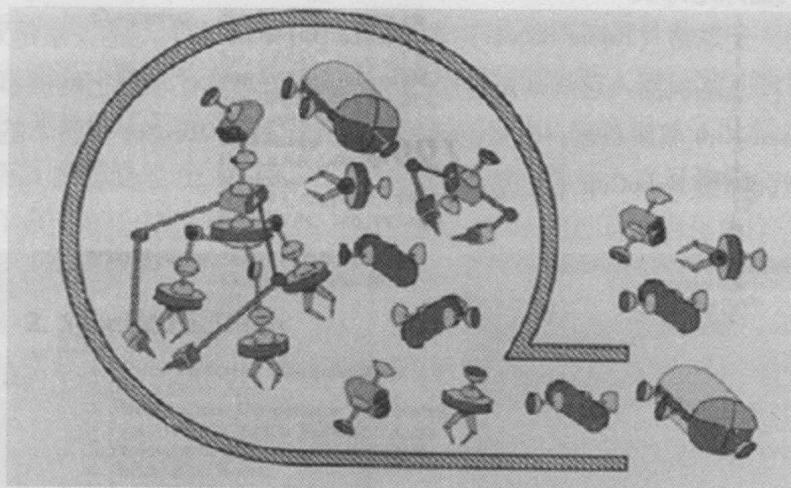
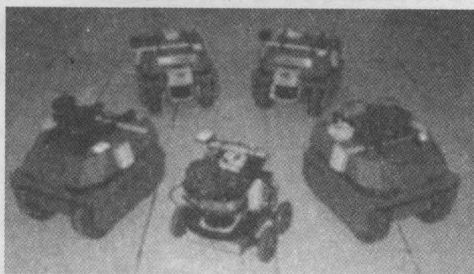


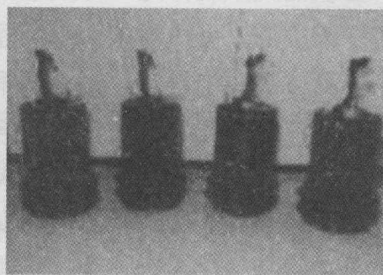
图 1.3 CEBOT 系统示意图

3. 协作机器人系统

协作机器人系统是由多个具有一定智能的自治机器人组成，机器人之间通过通信实现相互间的协作以完成复杂的任务。美国 Oak Ridge 国家实验室的 Lynne E. Parker 及其研究小组在协作机器人学方面做了许多工作，并建立了实验平台（CESAR Emperor 和 CESAR Nomads 机器人系统，如图 1.4 所示），进行理论的验证。多机器人协作装配系统（Multi - Robot Cooperative Assembly



(a)



(b)

图 1.4 CESAR 实验系统图

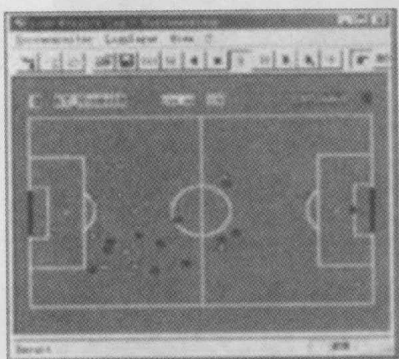
(a) CESAR Emperor; (b) CESAR Nomads



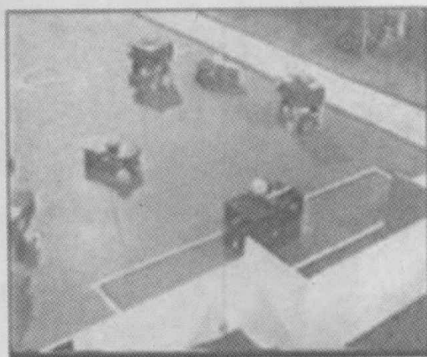
System, MRCAS) 是由中科院沈阳自动化研究所研制而成的, 对多机器人协作系统的实际应用具有参考价值。

4. 机器人足球赛

机器人足球赛 (Robot Soccer) 中不同球队的机器人之间的关系是对抗的、竞争的; 同队的机器人之间则是合作的、互助的。其中比较著名的赛事有韩国 Jong - Hwan Kim 教授发起并举行的微型机器人足球赛 MiroSot 和日本的机器人世界足球锦标赛 RoboCup (如图 1.5 所示)。



(a)



(b)

图 1.5 足球机器人系统

(a) 仿真机器人足球赛; (b) 实体机器人足球赛

1.1.2 多机器人系统研究中的主要问题

多机器人系统作为一种人工系统, 实际上是对自然界和人类社会中群体系统的一种模拟。多机器人协作与控制研究的基本思想就是将多机器人系统看作是一个群体或一个社会, 从组织和系统的角度研究多个机器人之间的协作机制, 从而充分发挥多机器人系统各种内在的优势。

与单个机器人相比, 多机器人系统具有如下优点。

(1) 更广的应用范围 单个机器人不能完成某些任务, 必须依靠多个机器人才能完成, 如执行战术使命、足球比赛等, 必须要由一个机器人团队来完成而非单个机器人。

(2) 更高的工作效率 对于可以分解的任务来说, 多个机器人可以分别在不同的地点和不同的时间并行地完成不同的子任务, 这比单个机器人完成所

有的子任务要快得多。例如,对未知的区域建立地图、对某区域进行探雷等等。

(3) 更有利于机器人设计 对于多机器人系统来说,可以将其中的成员设计成完成某项任务的“专家”,而不是设计成完成所有任务的“通才”,使得机器人的设计有更大的灵活性,完成有限任务的机器人可以设计得更完善。

(4) 更高的任务精确性 如果成员之间可以交换信息,多机器人系统可以更有效和更精确地进行定位。这对于野外作业的机器人尤其重要。

(5) 更好的鲁棒性和稳定性 多机器人系统中的成员相互协作可以增加冗余度,消除失效点,增加解决方案的鲁棒性。例如,装配有摄像机的多机器人系统要建立某动态区域的基于视觉的地图,那么某个机器人的失效不会对全局任务产生很大影响,因此,这样的系统可靠性更强。

(6) 更低的成本 同时建造若干个功能单一的机器人比建造一个具有很强大功能的机器人更加容易、灵活、经济,降低了设计和制造成本。

(7) 解决问题具有更多的选择方案 多机器人系统与单个机器人相比,可以提供更多的解决方案,因此可以针对不同的具体情况,优化选择方案。

多机器人协作系统涉及多个技术领域,其中的关键技术包括:

(1) 体系结构 体系结构决定了系统的整体运行效率。一般来讲,机器人协作系统的体系结构分为集中式和分散式两种。其中在分散式结构中,又分为分层式和分布式。

(2) 感知 最主要的感知问题是定位和环境建模问题。通过机器人之间的配合提高定位和环境建模能力,将会增强多移动机器人系统的整体性能。

(3) 规划 相应于体系机构,多机器人协作系统的规划可分为集中式规划和分布式规划。集中式规划基于全局信息,一般能找到全局最优解,但计算量较大,主要适用于静态环境,而并不适用于动态变化的环境。分布式规划中,每个机器人根据当前探测到的环境信息进行规划决策,能够对环境的变化作出灵活的反应,适用于动态的环境,但一般不能得到全局的最优解。

(4) 协调与协作策略 多机器人系统的协调策略可借鉴多智能体理论中的思想。但系统在实现这些思想的过程中,需要选择合适的工具来描述各层次的系统行为。另外,由于机器人在任务执行过程中需要共享资源,所以经常会发生资源使用冲突或由此导致的死锁情况。因此,死锁检测和冲突消解仍是多机器人系统面临的一个重大难题。



(5) 学习与演化 通过学习和演化,机器人系统能够优化系统的行为,从而展现出适应性、灵活性等智能特性。在机器人协作领域中,目前采用的主要学习方法为增强式学习和遗传规划等。总体来说,多机器人学习还停留在比较低的行为层次,其学习和演化的任务和环境也相对比较简单,当其面对更为复杂的任务和动态环境时,存在时滞评价和组合爆炸等问题,因此还有待寻找更为切实可行的学习方法。

(6) 系统软件平台开发与实验研究 随着多移动机器人硬件系统的逐步完善,迫切需要研制具有高度开放性、通用性和可扩展性的系统软件平台。美国和欧洲各国近年来启动了多项针对多机器人协作系统软件开发的大型项目,其中最具代表性的是美国国防部 DARPA 主持的 SDR (Software for Distributed Robotics) 和 MARS (Mobile Autonomous Robot Software) 项目。这些项目支持了几十所实力强劲的大学和研究机构展开与多机器人系统相关的软件开发工作,大大推动了多机器人系统的研究进展。

尽管多机器人系统在性能上优于单体机器人,但是一个多机器人系统并不是多个机器人的简单组合和堆砌,如果多个机器人之间缺乏有机的组织和交互,不但不能达到预期的效果,还有可能造成机器人之间的冲突与对抗,导致系统性能的下降。从这个意义上讲,多机器人系统的研究也面临着诸多挑战。主要问题包括:

(1) 系统结构 系统结构包括控制结构、组织结构及系统建模分析。群体的体系结构是系统中机器人之间逻辑上和物理上的信息关系和控制关系,以及问题求解能力的分布模式。它是整个系统执行协调合作任务的基础,决定了系统的能力和局限性。在确定体系结构时要考虑行为选择方式、通信结构、同构还是异构以及冲突解决等问题,再来决定是采用集中式还是分散式,或混杂式。

(2) 组织与协调 当给定一个任务时,多机器人系统首先面临的问题是如何组织多个机器人去完成任务。这时要解决的问题是多机器人间怎样进行有效的合作,即采用何种系统体系结构的问题。而当经过某种机制确定了体系结构后,即各自任务与关系后,问题变为如何保持机器人间的运动协调一致,即多机器人协调。这涉及各机器人任务、规划、控制间的协调,多智能体理论的研究已为这些协调行为提供了思想与策略,但如何把这些抽象层次上的思想与策略结合到具体系统中加以实现,同时又要使这些实现具有普适性,还需要进

一步的深入研究。

(3) 冲突消解 冲突问题是多机器人系统控制的一个重要课题。冲突的形式是多种多样的,如任务冲突、路径冲突、空间冲突等。多机器人系统中的冲突容易造成系统的动态停顿和混乱,影响系统的性能。解决冲突除了要有合理的控制结构和通信方式外,也需要相应的解决策略。

(4) 通信机制 个体之间的通信也是多机器人系统的一个重要研究问题,是研究多机器人系统的基础。多机器人之间通过必要的信息交流来进行同步或协调,如坐标确定、路径规划、防止死锁、避免碰撞等。

(5) 学习能力 多机器人系统的学习是系统不断寻找或优化控制参数以适应外界环境变化的一种手段。多数研究者认为要使机器人系统具有更大的潜能,其控制系统应具有学习能力,但至今在协作学习领域的成果还较少。

1.2 多水下机器人系统概述

多机器人系统研究的基本思路是建立在生物群体内部或相互之间协作的观察、研究上的。因而,多机器人系统与生物群体之间的这种自然联系使得机器人技术与生物仿生技术的结合成为必然。从而多水下机器人系统的研究大多是对多仿生机器鱼的设计和开发,将先进的鱼类仿生技术与多机器人技术紧密地结合到一起。

在自然界中,单条鱼的力量比较弱小,但作为一个群体,鱼类在攫取食饵、逃避敌害、繁殖后代和集群洄游等方面表现出的力量几乎令人难以置信。比如,生物学家发现,鱼群能够利用彼此之间产生的旋涡来提高游动效率。在集群洄游过程中,单条鱼的续航能力可增加 2~6 倍。对于鱼类的群体行为,人们试图从不同角度对其解释:①生存需要(捕食);②社会学行为;③遗传因素;④流体力学因素。在多水下机器人系统研究过程中,多机器鱼系统可描述为多条机器鱼(主体)在一个实时、噪声以及对抗性的环境下,通过协作、配合完成一个共同的目标或复杂任务。显然,在研究过程中,面对某项复杂任务,多机器鱼之间如何协调好各自目标与整体目标,如何避免冲突和死锁,已成为实时决策的一个基本问题。

虽然多水下机器人系统是当前机器人技术的研究热点,但由于水下机器人的研制工作相对陆地机器人起步较晚,因此目前关于多水下机器人协作系统问