



国际电气工程先进技术译丛


 Springer

自主移动机器人 行为建模与控制

Modelling and Controlling of Behaviour for
Autonomous Mobile Robots

(德) Hendrik Skubch 著
连晓峰 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

自主移动机器人行为 建模与控制

(德) Hendrik Skubch 著
连晓峰 等译



机械工业出版社

多智能体协调控制是机器人和人工智能领域的研究热点。本书主要涉及多机器人(多智能体)的协调控制问题,提出了一种交互式协作智能体语言 ALICA(交互式协作智能体语言),详细描述了 ALICA 的语法、语义、冲突检测与消解、软件架构、约束问题求解等内容。最后,通过三种场景,即机器人足球、探索和搜救来评估验证所提方法的有效性。

本书可作为多机器人协调控制、人工智能和计算机科学领域的研究人员的参考书,也可作为高等院校相关专业研究生以及教师的参考用书。

Translation from English language edition:
Modelling and Controlling of Behaviour for Autonomous Mobile Robots
by Hendrik Skubch
© Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2013
(formerly Vieweg + Teubner)

Springer Fachmedien is part of Springer Science + Business Media
Springer Fachmedien Wiesbaden is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-1301 号。

图书在版编目(CIP)数据

自主移动机器人行为建模与控制/ (德) 司库巴赫 (Skubch, H.) 著; 连晓峰等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 5

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Modelling and controlling of behaviour for autonomous mobile robots
ISBN 978-7-111-46357-3

I. ①自… II. ①司…②连… III. ①移动式机器人—研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 066513 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾谦 责任编辑: 顾谦

版式设计: 霍永明 责任校对: 纪敬

封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 12.75 印张 · 238 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-46357-3

定价: 59.90 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译 者 序

本书首先介绍了自主移动机器人行为建模与控制的研究意义和所涉及的相关研究，并阐述了智能体、多智能体、约束规划等理论基础，在简单描述一些相关理论和技术的基础上，提出了两种方法，分别是命题交互式协作智能体语言和通用交互式协作智能体语言。详细描述了 ALICA（交互式协作智能体语言）的语法、语义、冲突检测与消解、软件架构、约束问题求解等内容。最后，通过三种场景，即机器人足球、探索和搜救来评估验证所提方法的有效性。

本书是涉及多机器人协调控制方面的专著，机器人研究领域的成果很多，相关的理论与方法也很多，本书的创新点在于提出一种交互式协作智能体语言 ALICA 来解决在动态环境下，机器人实时反应并在通信不可靠条件下进行冲突检测与消解，通过约束满足与约束规划等理论来实现多机器人之间的协调控制。这对于从事该领域工作的工程人员和高年级学生有着重要的参考作用。

作者 Hendrik Skubch 曾是卡塞尔大学的助理研究员，现在在日本 Square Enix 公司工作，长期从事多机器人协调控制方面的研究，出版过多部相关著作。

本书主要由连晓峰翻译、审校、整理，并对原书中的错误进行了注释，王佩荣、潘媛、金成学、李东红、贾琦、张子康、王宇龙、郭柯、王伟和张云等人参与了部分内容的翻译。

本书可作为多机器人协调控制、人工智能和计算机科学领域的研究人员的参考书，也可作为高等院校相关专业研究生以及教师的参考用书。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

原书前言

随着研究的不断深入与机器人能力的不断提升，机器人系统也在越来越多的情况下具有切实可行的解决方案。这些成果尤其应用在多机器人系统中，将单机机器人的能力与功能相结合。未来自主移动机器人的鲁棒性、效率以及自适应性等关键特性都在复杂性和动态环境下得到充分应用。因此，不同建模和推理模式所引发的问题都可通过预期行为的描述来组合实现，并达到上述特性。本书提出了一种实现自主移动机器人团队行为的建模与执行的综合解决方案。所提出的框架 ALICA（交互式协作智能体语言）与建模技术相结合，以一种综合方式推导出不同模式。利用有限状态机的层次结构来构建机器人团队的行为，由此可表示其时间关系和因果关系。利用效用函数来衡量各自的不同选择，并对不同智能体分配不同任务。最后，将约束满足和优化问题相集成，可用于以一种简洁且具有良好的理论基础的方式来指定复杂的协作行为。该系统是针对要求机器人必须快速反应的高度动态环境，通信不可靠且单个机器人随时可能损坏的环境。在该环境下，要求智能体在面临不断变化的情况下必须及时反应，而不是采用预先设定的协议。由此，ALICA 智能体可局部决策并在建立通信之前相应动作。由不一致的决策和信任所产生的冲突可以可靠地检测和解决，这是由于 ALICA 完全分布式工作，不会出现单个故障。

从建模角度来看，ALICA 作为一种现代编程语言可对机器人团队进行全局建模。通过层次结构和程序组件的抽象可提高主题透明性和可重用性的复杂度。状态机、效用函数和非线性连续约束满足和优化问题相结合为描述机器人团队行为提供了一种为目前技术全新的方法。

执行层采用一种新的时间算法来解决综合约束问题，由此使得在动态环境中随时间跟踪解决方案，协调团队间的解决方案，并利用团队内部的分布式计算能力。

将该方法应用于机器人足球来进行评估，相对于非可靠通信，更关注于反应性和鲁棒性。在外星探索领域中，勾勒出一些先进技术来描述机器人动态编队。最后，对 ALICA 的可扩展性进行研究，并利用一个常用搜救场景与目前最先进的方法进行比较。

原书致谢

在此衷心感谢我的博士导师 Kurt Geihs，他在卡塞尔大学分布式系统团队创造了美好的氛围，思想自由和热情友好的精神使这里独一无二。另外，我还要感谢我的副导师，Alexander Kleiner，他付出了大量心血，让我受益匪浅。

对本书贡献最大的是 Roland Reichle 和 Philipp Baer，他们在我到卡塞尔大学工作之前，已成功地完成组建机器人足球中型组比赛队伍的工作。与此同时，我非常珍惜与各位同事共事的时光，Thomas Weise 经常为我提供大量建议，与我分享其独特观点，Michael Wagner 或许是最好的同事，Steffen Bleul 总能让我们脚踏实地工作，Michael Zapf 常常会进行富有成效的讨论。还有 Diana Comes 和 Christoph Evers，他们也为团队的友好氛围做出了大量贡献。同时，非常感谢 Thomas Kleppe、Iris Robbach 和 Heidemarie Bleckwenn 等工作人员，他们时常为我们提供无私的帮助。

Carpe Noctem 目前由 Dominik Kirchner、Daniel Saur 和 Andreas Witsch 领导，他们为机器人的实现提出了引人入胜的想法。与你们共度的时光太美妙了！非常感谢 Carpe Noctem 团队，不管是过去还是现有的成员，正是因为他们的努力工作才有团队现在的成绩：Till Amma、Kai Baumgart、Jewgeni Beigub、Fridolin Gawora、Tareq Haque、Janosch Henze、Timo Heumuller、Kai Liebscher、Claas Luhring、Stefan Jakob、Stefan Niemczyk、Stephan Opfer、Stefan Triller、Andreas Scharf、Jens Schreiber、Martin Segatz、Florian Seute、Daniel Walden 和 Martin Wetzel。我永远不会忘记我们共同工作、进行机器人、实验或仅仅是一起闲逛的美好时光，哪怕是机器人坏掉。

最后，感谢我的父母，是他们的无私支持让我取得现在的成就，另外也非常感谢 Caroline Wagenaar 的支持与耐心讨论，这不断激励着我继续前行。

Hendrik Skubch

目 录

| | |
|------|--|
| 译者序 | |
| 原书前言 | |
| 原书致谢 | |

第1部分 预备知识

| | |
|-------------|----|
| 第1章 引言 | 1 |
| 1.1 研究目的 | 1 |
| 1.2 问题描述 | 2 |
| 1.3 应用场景 | 3 |
| 1.3.1 机器人足球 | 4 |
| 1.3.2 探索 | 4 |
| 1.3.3 搜救 | 5 |
| 1.4 研究方法 | 5 |
| 1.5 创新与贡献 | 6 |
| 1.6 结构安排 | 7 |
| 1.7 惯例与约定 | 7 |
| 第2章 基础理论 | 9 |
| 2.1 智能体 | 9 |
| 2.2 多智能体系统 | 10 |
| 2.3 团队合作 | 12 |
| 2.4 约束规划 | 13 |
| 第3章 相关研究工作 | 15 |
| 3.1 行为演算 | 15 |
| 3.2 BDI 语言 | 16 |
| 3.3 规划执行语言 | 17 |
| 3.4 团队合作 | 18 |

| | | |
|-----|-----------|----|
| 3.5 | 任务和角色分配 | 20 |
| 3.6 | 评估协议和冲突消解 | 22 |
| 3.7 | 任务模型 | 22 |
| 3.8 | 基于约束的建模 | 23 |

第 2 部分 命题式 ALICA

| | | |
|-------|---------------|----|
| 第 4 章 | 语法 | 25 |
| 4.1 | 行为 | 26 |
| 4.2 | 规划 | 27 |
| 4.3 | 同步 | 32 |
| 4.4 | 角色 | 33 |
| 4.5 | 良好架构 | 34 |
| 4.6 | pALICA 语法元素概述 | 35 |
| 第 5 章 | 语义 | 37 |
| 5.1 | 基本原则 | 37 |
| 5.2 | 智能体模型 | 38 |
| 5.2.1 | 规划基 | 39 |
| 5.2.2 | 信念基 | 40 |
| 5.2.3 | 信念更新 | 43 |
| 5.2.4 | 执行集 | 43 |
| 5.2.5 | 角色集 | 43 |
| 5.3 | 局部性 | 44 |
| 5.4 | 团队配置 | 44 |
| 5.5 | 成功语义 | 45 |
| 5.6 | 角色分配 | 46 |
| 5.7 | 正则行为规划 | 48 |
| 5.8 | 任务分配 | 49 |
| 5.9 | 递归式任务分配 | 51 |
| 5.10 | 最优式任务分配 | 58 |
| 5.11 | 效用函数 | 59 |
| 5.12 | 任务分配算法 | 60 |
| 5.13 | 规则 | 68 |

VIII 自主移动机器人行为建模与控制

| | |
|--------------------------|-----------|
| 5.13.1 操作规则 | 69 |
| 5.13.2 修复规则 | 73 |
| 5.14 智能体配置一致性 | 79 |
| 5.15 本章小结 | 82 |
| 第6章 冲突检测与消解 | 83 |
| 6.1 冲突检测 | 83 |
| 6.2 冲突消解 | 87 |
| 第7章 软件架构 | 93 |
| 7.1 建模工具与交换格式 | 93 |
| 7.2 引擎布局 | 94 |
| 7.3 智能体软件架构 | 95 |
| 7.4 实现细节 | 96 |
| 7.5 通信 | 97 |
| 7.5.1 信息交换 | 97 |
| 7.5.2 当前团队估计 | 98 |
| 7.6 本章小结 | 100 |

第3部分 通用 ALICA

| | |
|-----------------------------|------------|
| 第8章 广义 ALICA | 101 |
| 8.1 简介 | 101 |
| 8.1.1 标准情况 | 101 |
| 8.1.2 积木世界 | 103 |
| 8.2 行为参数与规划变量 | 104 |
| 8.3 智能体变量 | 106 |
| 8.4 ALICA 中的约束条件 | 108 |
| 8.5 约束条件库 | 111 |
| 8.6 规则 | 111 |
| 8.6.1 提升命题式 ALICA 的规则 | 112 |
| 8.6.2 约束处理规则 | 113 |
| 8.7 查询 | 115 |
| 8.8 本章小结 | 117 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 第 9 章 约束问题求解 | 119 |
| 9.1 典型约束满足问题 | 119 |
| 9.2 非线性连续约束满足问题 | 121 |
| 9.3 重构 SMT 求解器 | 124 |
| 9.4 实时性考虑 | 127 |
| 9.5 协作 | 129 |
| 9.6 约束优化 | 134 |
| 9.7 约束与任务分配 | 138 |
| 9.8 本章小结 | 138 |
| 第 4 部分 评 估 | |
| 第 10 章 评价 | 141 |
| 10.1 机器人足球建模..... | 141 |
| 10.1.1 强同步与弱同步 | 142 |
| 10.1.2 有限状态机与动态任务分配 | 142 |
| 10.1.3 选择与执行 | 143 |
| 10.2 非可靠性通信..... | 145 |
| 10.3 约束求解与优化..... | 150 |
| 10.3.1 约束环问题 | 151 |
| 10.3.2 拦截问题 | 152 |
| 10.3.3 逆运动学 | 154 |
| 10.3.4 本节小结 | 157 |
| 10.4 案例分析：外太空探索..... | 157 |
| 10.4.1 取回物体规划类型..... | 158 |
| 10.4.2 搜索规划类型 | 160 |
| 10.4.3 本节小结 | 163 |
| 10.5 搜救仿真..... | 163 |
| 第 11 章 总结 | 171 |
| 11.1 需求分析..... | 172 |
| 11.2 展望与未来..... | 172 |
| 参考文献 | 174 |

第 1 部分 预备知识

第 1 章 引 言

1.1 研究目的

自从 Shakey 机器人通过 STRIPS (斯坦福研究所的问题求解器)^[45] 控制其行为在斯坦福大学里自主漫游开始, 个体机器人就已成为一个非常活跃的研究领域^[139]。尽管自此以后, 在机器人、人工智能和机器学习领域取得了大量的研究成果, 但直到近年来机器人才开始出现在人们的日常生活中。如今, 机器人已作为社会辅助技术成功应用于医院^[9] 的外科手术工具^[165], 并预计在不远的将来可用于家庭护理^[162]。

然而, 随着机器人与现代社会和经济的深入结合, 将不断要求机器人在现代化日常生活的动态环境中需具有智能性和自适应性行为能力。除了日常生活之外, 机器人的另一个主要目标是为人类无法到达或具有高度危险性的区域提供一种设计巧妙的机器。这些领域包括灾难性事件的搜救与救援、太空探索或未来小行星开采^[68]。而且, 这些机器还可完成过于重复性的任务。

在上述应用场景中, 潜在的异构机器人团队具有较大优势。团队机器人比个体机器人具有更高的鲁棒性, 并可在同一时间内搜索更大的区域。此外, 对于一个已处于工作状态的机器人, 集成一个新机器人通常要比集成一个新的特殊功能部件更容易。然而, 与个体机器人操作相比, 让团队机器人以高效、鲁棒的方式进行工作要面临更大的挑战。整个团队应相互协调, 对动态环境作出协调一致的反应, 并对丧失行为能力的团队成员进行补偿。所有这些问题都需要以一种自适应分布式方式实时处理, 这是因为采用任何一种集中控制机制都将失去团队机器人的最大优势, 即对于发生故障部件的鲁棒性。

在上述情况下, 创建一个可实现期望目标的解决方案或规划是一项艰巨任务, 无论该解决方案是否由规划算法生成, 或由相关领域专家建模, 或在规划过程中交互生成。因此, 具有期望行为的上述解决方案的底层执行至关重要, 即使在感知噪声较大、团队成员之间不可靠通信以及条件动态变化的困难情况下。

在更高层解决方案与团队表现行为的相互关系方面，解决方案的编程语言是一项重要因素。编程语言，或对编程语言的基本表征，必须被所有参与方理解，包括系统开发人员、规划算法或执行层。因此，编程语言应具有规范的语义，从而可验证个体机器人均遵循一个共同理解。另外，编程语言必须具有足够的表达能力来描述团队机器人所处的各种场景。

在搜索和救援场景中，团队机器人必须应对动态变化的情况，包括可能存在环境急剧变化、个体机器人失效以及通信不可靠等情况。在这些情况下，执行层的作用尤为重要。针对每种新情况，组件评估包括是否继续某一项行为动作，或应立即修复，或必须完全中止。然后，选择适当的修复机制，并触发更高层的元素，如规划算法（如果需要的话）。根据具体情况，或许不需要通信的迅速反应，在其他情况下，则需要团队成员之间进行通信来解决冲突。除此之外，正是该元素使得期望行为的符号描述与底层执行器相关联。换句话说，即将物理行为的动作符号具体化。这样，执行层就可支持高层规划和学习的认知能力。

最后，编程语言应能将具体部分的复杂性进行抽象，如在某一时刻，系统设计者只需关注具体问题。这就要求编程语言应支持关注点分离和组件的可重用性。

1.2 问题描述

本书的目的是为团队协作自主机器人的行为建模和控制提供一个综合解决方案。该方案包括两大部分：一是描述机器人团队行为的编程语言；二是将编程语言中的具体元素看作程序并有效和鲁棒地执行相应执行层。

为便于后续编程工具的支持，以及允许将来嵌入到其他编程语言或将其他编程语言移植进来，建模语言必须具有清晰规范的语义。根据所处的领域和场景，编程语言元素（如程序）将由开发人员编写或通过规划或学习算法自动生成。

与将在第3章中介绍的目前已有的许多编程语言和框架相比，该编程语言框架可支持全局建模，使得设计者只关注于较高抽象层次上的协作问题，而无需处理相互作用的多个具体程序。同时，该编程框架还可允许目标任务内部结构之间的精细建模。

如前所述，本书所提出的编程语言必须以一种简洁、明确的方式来实现复杂行为的规范化。由于具体行为总是与特定领域的机器人相关（如位置），因此该编程语言必须能够描述这些机器人的相关特性，同时还需保留其与领域无关的本质。在此，将一类约束满足和优化问题集成到该编程语言中，并对执行层配置一个相应的求解器。

本书主要考虑需要快速反应并推理的动态场景。更具体而言，即执行平台必

须可应对一个具有下列情况的动态环境：

- 状态连续实时变化，如在推理时。
- 传感器存在噪声，执行层需具有一定的抗扰性。
- 环境部分可见，机器人无法在长时间内有效预测其行为。
- 通信不可靠。在此假设概率大于0时才可通信，时常发生丢包和延迟。
- 个体机器人随时都可失控或丧失部分功能。只要有可能，团队机器人性能应适度降低。这不包括采用任何核心部件。

在这些特性之间存在某种程度的内部关联，这需要在本书的工作中进行平衡。首先，在处理动态环境下感知噪声时，对噪声的反应性和抗扰性是两个相互冲突的目标。同理，在高动态环境下，通信也不同步，因此所接收的消息总是针对之前状态的。尤其是，如果智能体时钟不能严格同步，随着环境的突然变化，信息包的延迟也会相应增大。一般来说，更注重对噪声的反应性，而不是抗扰性，然而本书中的编程框架可将任何一种感知处理方法和噪声处理聚类方法相结合。其次，智能体失效与数据包丢失没有区别，除非智能体动作可通过感知数据来观测。最后，反应行为和协作行为也是两个相互冲突的目标。如果进行决策时需要通信，则无法实现较高的反应行为。另一方面，通信或许是目前唯一可行的实现合作的方式。因此，需要一种自适应性方法，在没有前期通信的情况下进行快速决策，如果有必要，应切换到具有高度一致性协议的低层次反应决策。

由于与多机器人系统相关的研究领域有许多，本书中不考虑以下研究内容：

传感器融合——对于异构机器人团队中的传感器融合，Reichle^[13]进行了详细讨论。在所有的场景中，均假设已具有合适的传感器融合算法，由此在该基础上进行决策。

协同系统——在协同系统中，每个个体机器人都具有潜在的不同目标，这些不同目标暂时保持一致并保证形成可实现共同目标的联合体。在此，假设所有机器人都具有相同的全局目标，并在整个生命周期内构成一个团队。

规划——规划算法可生成全部或部分有序行为序列，以实现特定目标。在此并不制定或集成规划算法，然而可提供一种易于描述规划算法的编程语言。

1.3 应用场景

接下来，简单介绍用于开发和评估本书研究成果的应用场景。值得注意的是，本书方法并不局限于这些领域，并可非常方便地应用到其他领域。在本书方法中重点强调的是特定领域机器人与普通机器人之间的不同。因此，关于领域的描述是易于更换的。

1.3.1 机器人足球

RoboCup 是在机器人、人工智能以及相关领域许多国家深入研究并努力发展的项目。其核心是不同国家联赛的一个年度竞赛，并具有一个愿景：

“到 21 世纪中叶，按照 FIFA 的官方规则，一支完全由自主人形机器人组成的足球运动员在与当时世界杯冠军的足球对抗赛中获胜” RoboCup 网站^[137]。

出于这个美好愿望，RoboCup 也致力于一个主要的研究内容，即机器人足球。自从 1996 年开始首次比赛以来，RoboCup 目前已得到广泛普及并扩展了许多其他领域，如搜救机器人和家庭服务环境机器人，然而简单并具有巨大挑战的足球比赛仍是其主要关注的领域。相对于其他研究领域，足球比赛领域具有很多优势：首先，足球是一种众所周知的体育项目，因此无需过多解释即可引起普通大众的关注；另外，还是一个以对抗方式对不同方法进行评估的测试平台；而且在足球比赛中，每个个体运动员的能力技巧与团队配合同样重要。因此，需要具备个人能力以及团队配合能力，才能组成一支优秀的机器人足球队。最后，足球是一项快节奏的项目，需要高度的反应能力和速度。这种需求使得机器人足球不同于典型的实验室配置，必须满足参加机器人足球所需要的基本要求。

本书中所涉及 RoboCup 领域，重点关注一种特定的 RoboCup 联赛，即中型组比赛（MSL）。在 MSL 中，5 个机器人组成的队伍要在一块 $18\text{m} \times 12\text{m}$ 的场地上相互对抗。该比赛包括上下两个半场，每个半场进行 15min。采用标准的 FIFA 足球进行比赛。在比赛中，每个机器人完全自主行动，严格禁止人为操作。目前，参赛机器人最大 80cm 高，不超过 40kg 重。大多数机器人采用全驱运动，以及一个独立的踢球装置进行长距离传球。机器人之间通过无线局域网进行通信。比赛是高度动态的，机器人可达到 5m/s 的速度，带球运动速度可达到约 12m/s 。鉴于在理想状态下，机器人配置的典型传感器感知范围不大于 10m，通常小于 6m，对于机器人性能而言，反应速度尤为关键。除此以外，机器人还需协调一致地行动和反应。在本书的研究工作中，在保证机器人团队相互协调以形成一致行动的情况下，尽可能地保持快速反应时间。

1.3.2 探索

在自主移动机器人应用中，探索任务是一个非常有益的应用场景。执行探索任务时的环境通常是难以到达第一现场或对人类具有危险性的地方。例如，对于外星探索任务，就同时具有上述两个特点。而且，天体之间的超远距离也难以遥控机器人，甚至根本无法实现。因此，关键在于要赋予探索机器人一定程度的自治性。

IMPERA 研究项目就是针对上述场景开展研究的，该项目是由 Kassel 大学的

DFKI[⊖]机器人创新中心联合分布式系统研究团队，并与 DLR[⊖]合作共同完成的。基于团队机器人要比单个机器人更具有鲁棒性和容错性，并且任务完成（如探索任务）要更加快速的思想，IMPERA 主要针对外星环境下机器人的协调合作进行深入研究。

尽管在火星或月球环境下，机器人的动态性远不及足球比赛的环境，但还需考虑 1.2 节中讨论的其他特性。然而，团队机器人本身可通过与外界环境的交互在一定程度上降低动态性。

本书所提方法仅作为 IMPERA 在外星探索任务环境下协调控制机器人的基本方法。尤其值得注意的是，IMPERA 利用先进规划算法对本书方法进行扩展。

1.3.3 搜救

在搜救场景下，机器人可完成多种潜在任务。例如，机器人可作为救援人员在大范围区域内搜索幸存者、提供通信网络、清除废墟、进入摇摇欲坠的建筑物。在本书中，根据 RoboCup 救援仿真比赛，重点研究一个简单场景。在该场景中，智能体将在城市中的多个着火点进行灭火任务。在此采用 Kleiner 等人^[86]提出的 RMAS-BENCH 来模拟仿真该基本问题。在搜救领域，需要比探索或足球比赛领域更多的智能体进行协调合作。

1.4 研究方法

如上所述，本书所提出的解决方案包括一种编程语言和相应的执行层。为抽象化执行过程中行为描述和具体机器人之间的关系，采用行为描述中机器人与任务之间的两个映射关系。根据具体执行器和感知器、智能体或机器人所具有的个体能力与相应的角色相对应。这些角色又决定着该智能体所能完成的任务以及执行程度。这种映射关系完全按照 Wooldridge 等人^[182]所提出的思想。由此，团队机器人行为与运行时的具体机器人相互独立，而且团队机器人也可独立指定后续应解决的问题。

团队行为程序是一种多个有限状态机的层次结构。状态机的每个状态中都包含多个子程序，这意味着可由继承该状态的所有智能体执行。每一层中的条件和效用函数决定哪个智能体执行哪种状态机。每个智能体对这些条件和函数进行局部评估，以实现高度反应行为。该层次结构隐藏了每层中较低层次的复杂性。

⊖ 德国人工智能研究中心。

⊖ 德国宇航中心。

通过冲突检测和冲突消解机制，对基本编程语言进行扩展，即选择一个领导者来暂时切换决策协议，从而解决检测到的冲突。然后，相对于冲突时的决策，该领导者只对团队其他成员发布命令。冲突解决后，团队又切换回其初始状态，具有更多的动态决策模式。

最后，利用约束来描述机器人应具有的目标值。在动态约束优化问题中的这种结果由团队成员实时求解。在此对该任务中的非线性连续约束优化问题提供一种有效的任意求解器。随着环境以及相应的优化问题的变化，该求解器可跟踪解决方案。而且在解决难题时，团队成员相互合作，因此可比单个智能体更快地找到解决方案。最后，求解算法使得团队合作解决，从而得到一致结果。执行层管理活动约束集合，使得任何部分都按照变量值进行排列。作为声明描述的非合作约束，将其添加到编程语言中是非常有利的。

- 极大地简化建模任务，并减少所需的不可分行为的个数。
- 只要约束之间的数据关系清楚，易于对约束进行扩展和联合。例如，可直接构建两个约束满足问题之间的交集。
- 与专用程序相比，无需处理太多的特殊情况。
- 通过规划和学习算法，数学描述与具体实现的直接对应可生成约束。
- 最重要的是，约束提供一种以数值形式来进行符号行为描述的方式，这可传递到较低层次单元，如电动机控制器。

当然，所提方法也有其缺点。一个通用求解器在效率方面总是超出具体问题解决方案的执行。因此，设计一个专用程序来处理特定任务肯定会比解决同样问题基于约束的解决方案更加有效。

1.5 创新与贡献

本书的主要贡献在于为团队机器人的行为描述提供一种全面的解决方案。在此介绍的范例组合为多机器人系统的合作行为提供一种全新方法。称为 ALICA（交互式协作智能体语言）的方法包含功能描述、角色分配、类似于层次状态机的任务描述、基于效用函数的任务分配、通过同步转换的显式协调、广播计算方式的隐式协调以及通过切换正在采用的决策协议来进行冲突检测和冲突消解。最后，与非线性约束满足问题相结合，以允许特定域实体内的推理（如关节位置和配置）。在此，将该全面综合的组合方式作为本书的最大贡献。

自从 2009 年，该方法已成功应用于参加 RoboCup MSL 比赛的机器人队伍 Carpe Noctem 中，并且现已应用于 IMPERA 研究项目。在基于 BSD 的开放源代码

协议下，可提供源代码[⊖]。

在理论方面，将新方法引入分层任务分配中，根据任务结构的不同需求，可产生两种不同的分配机制。而且提出一种任意约束优化求解器，将现有的用于非线性连续满足问题的先进方法进行扩展。值得注意的是，该方法具有随时间跟踪解决方案的能力，并提供团队内部的合作解决方案，以及在保证单个机器人反应能力下的分布式问题求解能力。

1.6 结构安排

本书分为 4 个部分。第 1 部分中的其余章节主要包括：第 2 章介绍本书工作的基础知识，接下来在第 3 章中介绍与本书所提方法相关的研究工作。

第 2 部分主要详细介绍 ALICA 的命题式核心语言。在第 4 章介绍 ALICA 基本语法之后，第 5 章逐一介绍相关语义。在该部分中重点阐述任务分配和基于规则的执行，这些将构成后续章节的基础。

第 6 章中通过增加冲突检测和冲突消解对基本语义进行扩展。推导了域无关的冲突检测机制，这可对团队合作中的持续冲突进行可靠检测。之后，提出了一种基于局部领导者选举的冲突消解方法。在第 2 部分的结尾，即第 7 章中，详细介绍了关键的软件架构和具体实现。

第 3 部分，通过考虑变量和约束条件对命题式语言进行扩展。相应地，在第 8 章中介绍了语法和操作语义，以适用于额外的编程语言元素。接着，在第 9 章中推导并详细讨论了一种适当的约束求解算法。本章的其余部分解释了如何随时间跟踪解决方案，以及如何实现非命题式情况下的合作。

第 4 部分重点关注所提解决方案的评估和讨论。第 10 章中给出了全面的评估结果。利用机器人足球、探索和搜救等场景，着重讨论了不同场景下，网络较差条件下的鲁棒性，噪声条件下的鲁棒性，建模能力，可扩展性和适用性。在第 11 章中进行总结，并展望今后的研究工作。

1.7 惯例与约定

为简单起见，在此假设本书中的符号约定如下：

- 有限集的减法运算用 $-$ 表示：

$$A - B \stackrel{\text{def}}{=} \{a \mid a \in A \wedge a \notin B\}$$

⊖ <http://ros.org/wiki/cn-alice-ros-pkg>。