



多智能体 模型与实验

[加] Jiming Liu 著
靳小龙 张世武 吴建兵

4
24

清华大学出版社



多智能体

模型与实验

[加] Jiming Liu

著

靳小龙 张世武 吴建兵

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书重点介绍多智能体系统的模型研究和机器人模拟实验。通过本书,读者能够了解在执行合作式任务时,机器人个体的自治与机器人群隐现的全局行为模式之间的关系,了解成功开发多智能体机器人系统的一些关键方法,理解多智能体系统工程的潜在计算模型与技术。

本书可作为各类高等学校计算机科学与技术专业及相关专业的研究生教材,也可供有关研究人员与工程师参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

多智能体模型与实验/[加]Jiming Liu等著. —北京:清华大学出版社,2003

ISBN 7-302-07016-4

I. 多… II. J… III. ①人工智能 ②人工智能—数学模型 ③机器人—实验 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 071013 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 赵彤伟

文稿编辑: 张为民

印 刷 者: 北京昌平环球印刷厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 15.5 字 数: 316 千字

版 次: 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07016-4/TP·5162

印 数: 1~4000

定 价: 35.00 元

Not everything that can be counted counts, and not everything that counts can be counted.^①

自治智能体是这样—个计算系统：它能够得到并分析所感知到的数据或者外部激励，然后通过执行—定的行为来对环境产生影响。它可以决定如何把感知到的数据与其行为联系起来以便实现某些目标。这种系统能够用来处理不可预测的环境、动态变化的环境、不能良好建模的环境以及存在冲突的约束。

多智能体机器人系统研究与发展的动机来源于以下事实，即分散式多机器人方法相对传统的单个复杂的机器人系统具有很多的优点：基于冗余的可靠性、适应性以及可维护性，分布式机器人能够很容易地展现出结构的灵活性。此外，分布式机器人所需要的硬件很简单，而且还可以重新配置。机器人能够在集体解决问题的过程中与其局部环境进行交互。对于任务环境中不同的局部约束，它们可以选择并展示不同的行为模式，如躲避、跟踪、聚集、发散、回归以及徘徊等。这些行为可以通过—组参数（如运动方向、时间、生命期、年龄等）精确地控制。这些参数可以是人们精心设计的，也可以是机器人根据某种计算机制而动态学习到的。

为了成功地开发多智能体机器人系统，需要仔细研究—些关键方法。同时，还要透彻理解多智能体系统工程的潜在计算模型与技术。本书的重点在于对计算模型的研究以及机器人的模拟实验。本书的目的是：介绍多智能体机器人技术研究的前沿性工作以及主要的技术问题（第1~5章）；深入地讨论机器人群的行为的计算机制（第6~14章）。通过系统的研究，希望读者能够理解在执行合作式任务时，机器人个体的自治与机器人群隐现的全局行为模式之间的关系。

为了让读者更好地理解本书所阐述的主题，学会运用所演示的技术，本书注意了以下方面。

① A sign hanging in Albert Einstein's office at Princeton.

- (1) 注意多智能体机器人系统在理论计算与实验之间的平衡。
- (2) 在材料组织上,以一种系统的内在方式来组织实现细节、典型示例以及情形研究。
- (3) 运用大量图形来解释并强调重要的行为与相应的原理。
- (4) 在部分章节后面提供了用于多智能体机器人研究、实验以及结果分析的MATLAB工具箱。关于这些工具箱软件,感兴趣的读者可以到 *jiming @ comp. hkb. edu. hk* 索取。

希望读者在读完本书之后能够对多智能体机器人系统开发与应用的各種方法有深入的了解。特别希望读者能够透彻理解下面5个问题。

- (1) 为什么要开发学习和进化自治机器人感知数据-运动控制行为的计算机制? 如何开发?
- (2) 如何使群体机器人通过群体的学习收敛到有限的所要求的任务状态?
- (3) 局部学习机制对全局行为隐现的影响是什么?
- (4) 如何设计开发基于进化算法的行为学习机制,以便隐现最优的(群体)行为?
- (5) 如何使用分散式的、自组织的自治机器人在一个未知环境中执行合作式任务?

本书可作为各类高等学校计算机科学与技术专业及相关专业的研究生教材,也可供有关研究人员与工程师参考。

本书由加拿大的 Jiming Liu 和中国的靳小龙、张世武、吴建兵著,由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,衷心希望广大读者批评指正。

作 者
2003年6月

| | | |
|--------------|-------------------|----|
| 第 1 章 | 为什么需要多个机器人 | 1 |
| 1.1 | 多机器人的优点 | 1 |
| 1.2 | 经典问题 | 2 |
| 1.3 | 智能体与多智能体系统 | 2 |
| 1.4 | 多智能体机器人学 | 3 |
| 第 2 章 | 合作式机器人的控制 | 6 |
| 2.1 | 与合作有关的研究 | 6 |
| 2.1.1 | 分布式的人工智能 | 7 |
| 2.1.2 | 分布式系统 | 7 |
| 2.1.3 | 生物学 | 7 |
| 2.2 | 学习,进化与适应 | 8 |
| 2.3 | 多机器人控制的设计 | 9 |
| 第 3 章 | 主要的机器人技术 | 11 |
| 3.1 | 基于行为的机器人技术 | 11 |
| 3.2 | 集体机器人技术 | 12 |
| 3.3 | 进化机器人技术 | 13 |
| 3.4 | 来自生物学与社会学的启发 | 15 |
| 3.5 | 总结 | 16 |
| 第 4 章 | 计算模型与技术 | 17 |
| 4.1 | 强化学习 | 17 |
| 4.1.1 | 马尔可夫决策过程 | 18 |
| 4.1.2 | 强化学习算法 | 18 |
| 4.1.3 | 时间差分技术 | 19 |
| 4.1.4 | Q-学习 | 19 |
| 4.1.5 | 多智能体强化学习 | 19 |
| 4.2 | 遗传算法 | 21 |

| | | |
|------------|---------------------------------|-----------|
| 4.3 | 人工生命 | 22 |
| 4.4 | 人工免疫系统 | 23 |
| 4.5 | 概率建模 | 24 |
| 4.6 | 有关多机器人规划与协调的研究 | 25 |
| 第5章 | 多智能体机器人系统设计主要的研究课题 | 27 |
| 5.1 | 自组织 | 27 |
| 5.2 | 局部性能与全局性能 | 28 |
| 5.3 | 规划 | 28 |
| 5.4 | 多机器人学习 | 29 |
| 5.5 | 协同进化 | 29 |
| 5.6 | 隐现行为 | 30 |
| 5.7 | 反应式系统与推理式系统 | 30 |
| 5.8 | 异类系统与同类系统 | 31 |
| 5.9 | 模拟机器人与实体机器人 | 31 |
| 5.10 | 多智能体机器人系统的动力性 | 32 |
| 5.11 | 总结 | 33 |
| 第6章 | 多智能体强化学习中的技术 | 34 |
| 6.1 | 自治的群体机器人 | 34 |
| 6.1.1 | 概述 | 34 |
| 6.1.2 | 感知能力 | 35 |
| 6.1.3 | 远程传感器 | 35 |
| 6.1.4 | 短程传感器 | 36 |
| 6.1.5 | 激励提取 | 37 |
| 6.1.6 | 简单行为 | 39 |
| 6.1.7 | 运动机制 | 40 |
| 6.2 | 多智能体强化学习 | 40 |
| 6.2.1 | 强化学习的原理 | 41 |
| 6.2.2 | 行为选择机制 | 43 |
| 6.3 | 多智能体强化学习工具箱 | 43 |
| 6.3.1 | 体系结构 | 43 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|-----------|
| 6.3.2 | 文件组织 | 45 |
| 6.3.3 | 函数说明 | 45 |
| 6.3.4 | 用户设置 | 47 |
| 6.3.5 | 数据结构 | 47 |
| 6.4 | 总结 | 48 |
| 第 7 章 | 多智能体强化学习中的结果分析 | 50 |
| 7.1 | 测量 | 50 |
| 7.1.1 | 激励频率 | 50 |
| 7.1.2 | 行为选择频率 | 52 |
| 7.2 | 群体行为 | 52 |
| 7.2.1 | 集体包围 | 52 |
| 7.2.2 | RANGER 机器人间的合作 | 56 |
| 7.2.3 | 不同机器人群的并发学习 | 61 |
| 第 8 章 | 多智能体强化学习中的要素 | 71 |
| 8.1 | 集体感知 | 71 |
| 8.2 | 初始空间分布 | 79 |
| 8.3 | 反 S 型函数 | 83 |
| 8.4 | 行为选择机制 | 83 |
| 8.5 | 运动机制 | 87 |
| 8.6 | 隐现的周期性运动 | 89 |
| 8.7 | 宏观稳定而微观不稳定的属性 | 90 |
| 8.8 | 主导行为 | 91 |
| 第 9 章 | 进化的多智能体强化学习 | 93 |
| 9.1 | 机器人群示例 | 93 |
| 9.1.1 | 目标的空间分布 | 95 |
| 9.1.2 | 目标的运动特征 | 95 |
| 9.1.3 | 行为学习机制 | 95 |
| 9.2 | 进化群体运动策略 | 95 |
| 9.2.1 | 染色体表示 | 96 |

目 录

| | | |
|---------------|---------------------|------------|
| 9.2.2 | 适应度函数 | 96 |
| 9.2.3 | 算法 | 98 |
| 9.2.4 | 遗传算法中的参数 | 98 |
| 9.3 | 例子 | 99 |
| 9.4 | 进化的多智能体强化学习工具箱 | 103 |
| 9.4.1 | 文件组织 | 103 |
| 9.4.2 | 函数说明 | 103 |
| 9.4.3 | 用户设置 | 104 |
| 9.5 | 总结 | 105 |
| 第 10 章 | 双智能体系统中的协同行为 | 106 |
| 10.1 | 研究重点 | 106 |
| 10.2 | 双智能体的学习 | 107 |
| 10.3 | 双智能体系统的特殊角色 | 107 |
| 10.4 | 机器人智能体的基本能力 | 108 |
| 10.5 | 建议提供智能体的基本原理 | 109 |
| 10.5.1 | 基本动作——学习的先决条件 | 109 |
| 10.5.2 | 一般性行为的遗传规划 | 109 |
| 10.5.3 | 特殊策略性行为的遗传规划 | 110 |
| 10.6 | 复杂行为的学习 | 111 |
| 10.6.1 | 实验设计 | 111 |
| 10.6.2 | 机器人环境的复杂性 | 111 |
| 10.6.3 | 实验结果 | 112 |
| 10.6.4 | 平面姿态 | 112 |
| 10.6.5 | 曲线姿态 | 115 |
| 10.6.6 | 角姿态 | 115 |
| 10.6.7 | 点姿态 | 115 |
| 10.7 | 总结 | 115 |
| 第 11 章 | 集体行为 | 117 |
| 11.1 | 群体行为 | 118 |
| 11.1.1 | 什么是群体行为 | 118 |

| | | |
|---------------|----------------------------|------------|
| 11.1.2 | 群体行为学习回顾 | 118 |
| 11.2 | 方法 | 119 |
| 11.2.1 | 基本思想 | 119 |
| 11.2.2 | 群体机器人 | 120 |
| 11.2.3 | 集体推箱的性能标准 | 120 |
| 11.2.4 | 集体推箱行为的进化 | 120 |
| 11.2.5 | 远程的进化计算智能体 | 121 |
| 11.3 | 应用排斥力的集体推箱 | 121 |
| 11.3.1 | 人工排斥力模型 | 122 |
| 11.3.2 | 推力与箱子的相应运动 | 122 |
| 11.3.3 | 染色体表示 | 122 |
| 11.3.4 | 适应度函数 | 123 |
| 11.3.5 | 例子 | 124 |
| 11.4 | 用外部接触力与力矩集体推箱 | 129 |
| 11.4.1 | 3个群体机器人与箱子之间的交互作用 | 129 |
| 11.4.2 | 推圆柱体箱子 | 129 |
| 11.4.3 | 推立方体箱子 | 130 |
| 11.4.4 | 染色体表示 | 131 |
| 11.4.5 | 适应度函数 | 131 |
| 11.4.6 | 例子 | 132 |
| 11.5 | 最优保留进化的收敛性分析 | 144 |
| 11.5.1 | 马尔可夫链的转移矩阵 | 144 |
| 11.5.2 | 用特征值描述转移矩阵特征 | 145 |
| 11.6 | 进化的集体行为实现工具箱 | 148 |
| 11.6.1 | 用人工排斥力集体推箱的工具箱 | 149 |
| 11.6.2 | 实现推圆柱体箱子或立方体箱子任务的工具箱 | 153 |
| 11.7 | 总结 | 158 |
| 第 12 章 | 多智能体的自组织 | 159 |
| 12.1 | 人工势能场 | 160 |
| 12.1.1 | 基于人工势能场的运动规划 | 160 |
| 12.1.2 | 集体势能场图的构建 | 161 |

目 录

| | | |
|---------------|-------------------------|------------|
| 12.2 | 自组织概述 | 161 |
| 12.3 | 势能场图的自组织 | 162 |
| 12.3.1 | 机器人的坐标系 | 162 |
| 12.3.2 | 接近度测量 | 163 |
| 12.3.3 | 邻域的距离联想 | 163 |
| 12.3.4 | 势能场图的递增式自组织 | 164 |
| 12.3.5 | 机器人的运动选择 | 165 |
| 12.4 | 实验 12-1 | 166 |
| 12.4.1 | 实验设计 | 166 |
| 12.4.2 | 实验结果 | 167 |
| 12.5 | 实验 12-2 | 172 |
| 12.5.1 | 实验设计 | 172 |
| 12.5.2 | 实验结果 | 177 |
| 12.6 | 讨论 | 177 |
| 12.7 | 多智能体自组织工具箱 | 179 |
| 12.7.1 | 体系结构 | 179 |
| 12.7.2 | 文件组织 | 179 |
| 12.7.3 | 函数说明 | 179 |
| 12.7.4 | 用户设置 | 182 |
| 12.7.5 | 数据结构 | 182 |
| 第 13 章 | 进化的多智能体自组织 | 183 |
| 13.1 | 合作式运动策略的进化 | 184 |
| 13.1.1 | 接近度激励的表示 | 185 |
| 13.1.2 | 激励-反应对 | 185 |
| 13.1.3 | 染色体表示 | 186 |
| 13.1.4 | 适应度函数 | 186 |
| 13.1.5 | 算法 | 187 |
| 13.2 | 实验 13-1 | 189 |
| 13.2.1 | 实验设计 | 191 |
| 13.2.2 | 与非进化模式的比较 | 191 |
| 13.2.3 | 实验结果 | 192 |

| | | |
|---------------|---------------------------|------------|
| 13.3 | 讨论 | 196 |
| 13.3.1 | 群体行为的进化 | 196 |
| 13.3.2 | 机器人的合作 | 196 |
| 13.4 | 进化的多智能体自组织工具箱 | 199 |
| 13.4.1 | 体系结构 | 199 |
| 13.4.2 | 文件组织 | 201 |
| 13.4.3 | 函数说明 | 201 |
| 13.4.4 | 用户设置 | 201 |
| 13.4.5 | 数据结构 | 204 |
| 13.5 | 总结 | 207 |
| 第 14 章 | 多智能体机器人技术工具箱 | 208 |
| 14.1 | 概述 | 208 |
| 14.2 | 例子 | 208 |
| 14.2.1 | 真实图的计算 | 209 |
| 14.2.2 | 初始化 | 211 |
| 14.2.3 | 开始 | 212 |
| 14.2.4 | 结果显示 | 213 |
| | 参考文献 | 215 |
| | 索引 | 231 |

为什么需要多个机器人

So, then, to know a substance or an idea we must doubt it, and thus, doubting it, come to perceive the qualities it possesses in its finite state, which are truly "in the thing itself" or "of the thing itself" or of something or nothing. If this is clear, we can leave epistemology for the moment. ①

Woody Allen

分布式与合作式机器人技术起源于 20 世纪 80 年代后期,当时部分研究人员开始研究由多个移动机器人所构成的系统中的问题^[1,2]。此前,人们研究的要么是单个机器人系统,要么是不涉及机器人的分布式问题求解系统^[3]。而在此之后,该领域得到了快速发展,研究更加广泛深入。

1.1 多机器人的优点

多个机器人的使用比单机器人系统有许多的优点^[4-6]。合作的机器人有比单个机器人更加有效地完成一些任务的潜能。Fox 等^[7]已经演示说明如果多个机器人一旦感知到对方并交换彼此位置信息的话,它们就能够更快、更准确地定位。此外,使用几个低成本的机器人会产生冗余,从而比只有一个强大而昂贵的机器人更加能够容忍错误。总的来说,多机器人系统有下面的显著特性:

- 更广泛的任务领域;
- 更高的效率;
- 改良的系统性能;
- 错误容忍;
- 鲁棒性;
- 更低的经济成本;

① *Getting Even*, W. H. Allen & Co. Ltd., London, 1978, p. 29.

- 容易开发；
- 分布式的感知与作用；
- 内在的并行性；
- 对社会和生命科学的观察。

1.2 经典问题

开发一个多机器人系统时,主要问题之一就是如何使个体机器人能够适应其任务环境的动态变化而自动地规划其任务处理行为。有些研究人员已经开始研究多个自治机器人的协作问题。Mataric^[8,9]提出了一种群体行为学习方法,在这种方法中,用基于不同类型奖励函数的强化学习来联系6个具有触发条件的基本行为的觅食(行为)子集(即总和或转化)。Fukuda与Iritani提出了一种在分散式自治机器人系统中隐现群体合作行为的机制,称作CEBOT(即细胞机器人)^[10]。他们的工作基于一个全局稳定的吸引子来模拟群体行为的隐现,基于分叉生成的新吸引子来模拟新群体行为的产生。

Cao等^[11]指出了研究移动机器人群的几个主题:群体控制结构(如分散式与微分式)、资源冲突解决(如空间共享)、合作起源(如遗传决定的社会行为与基于交互的合作行为^[12])、学习(如为所要求的合作而调整控制参数)以及几何问题解决(如几何模式的形成)。虽然单个自治机器人的行为工程方法可以简单地定义为目标行为分析、结构设计、实现、训练以及行为评估5个阶段^[13],但复杂机器人群体行为的隐现依然是个悬而未决的问题。

多机器人系统的设计很有挑战性,因为这种系统的性能很大程度上依赖于机器人之间交互的问题^[14]。由于这种交互并不体现在硬件或软件的设计上,而只是在合作的群体中隐现出来,所以使得开发变得复杂化。要对在一个处在未知的、非结构性的或者动态的环境中的机器人队伍的群体行为,以自顶向下的方式进行建模并设计集中式的控制是很困难的,甚至是不可能的。也不存在匹配多机器人配置与其任务的自动方法。比如说,合作与机器人间的干涉并不是单个机器人的考虑所在,而是多机器人系统的关键。

1.3 智能体与多智能体系统

Maes^[15]定义智能体是“试图在复杂的动态环境中实现一组目标的计算系统”。它能够通过传感器感知环境,并通过执行器对环境起作用。依靠其所驻留环境的类型,智能体能够有许多不同的形式。特别在物理环境中驻留的智能体就是机器人。Maes提出,智能体的目标可以有很多不同的表现形式:它们可以是智能体尝试去达到的终极目标或特殊状态,可以是智能体试图最大化的选择性强化或奖励,也可以是智能体必须保持在某个生

存区域内的内部需要或动机,等等。

根据文献[16]中所述,可以区分强智能体性(strong agency)与弱智能体性(weak agency)的概念。根据弱智能体性的定义,一个智能体应该具有下面的属性:

- 自治性(autonomy);
- 反应性(reactivity);
- 前摄性(proactiveness)。

根据强智能体性的要求,还可以有其他的属性或心智态度用来刻画一个智能体,比如:

- 信念(belief)、知识(knowledge)等(描述信息状态);
- 意图(intention)、承诺(commitment)等(描述协商状态);
- 期望(desire)、目标(goal)等(描述动机状态)。

正如 Maes^[15]所说,一个智能体称为是自治的,它能完全自治地起作用,即以成功实现目标的方式来自主地决定如何去联系感知数据与马达命令。如果一个智能体能够随着时间而改进其实现目标的能力,那么就说该智能体是适应性的。自治智能体为人工智能的研究提供了一种新的方法,它受到生物学,特别是生态学动物行为研究的极大启发。自治智能体方法适合于解决系统在一个动态的、复杂的、不可预测的环境中自治地达到一些目标的问题。

近年,人们对包含有几个交互作用的自治智能体而不是单个智能体的系统的兴趣迅速提升。Weiss 与 Dillenbourg^[17]提出至少 3 个原因来解释人们对多智能体的兴趣:

- (1) 它们可以应用在许多不能被集中式系统所处理的领域;
- (2) 它们反应了人们上一时代在诸如人工智能、心理学与社会学等学科的认识,即“智能与交互深入而又不可避免地联系在一起”;
- (3) 还没有一个实现复杂多智能体系统的计算机与网络技术的坚实平台。

文献[18]罗列了早期与多智能体系统有关的工作。更新一点的工作可以在文献[19]中找到。

1.4 多智能体机器人学

表 1.1 中给出了多智能体机器人系统的一些典型例子。正如 Arkin^[20]所说,CEBOT^[2]可以看做是第一个多智能体机器人系统。它是一个由能够聚集在一起而产生更大机器人的小机器人所构成的细胞机器人系统。CEBOT 的研究使用了一个有多个由向量和集成在一起的并行行为的结构。MARS^[21]的动机是设计类生命的机器人系统。多智能体机器人系统的研究^[22]所关注的是多机器人系统中的学习,比如,寻找什么样的条件导致一个学习队伍的多样性,如何去度量它等。它还要研究一些多智能体机器人系

表 1.1 一些代表性的多智能体机器人技术的研究

| 项 目 | 研究人员 | 单 位 | 主 页 |
|-------------|---------------|--------------|---|
| CEBOT, MARS | T. Fukuda | 名古屋大学, 日本 | http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/ |
| 多智能体机器人系统 | R. C. Arkin | 佐治亚工学院, 美国 | http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/robot-lab/research/multi-agent.html |
| 多机器人系统 | M. J. Mataric | 南加利福尼亚大学, 美国 | http://www-robotics.usc.edu/~maja/group.html |
| 生物机器人技术 | R. Pfeifer | 苏黎世大学, 瑞士 | http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/ |
| 集体机器人技术 | J. D. Nicoud | 瑞士联邦工学院, 瑞士 | http://diwww.epfl.ch/lami/ |
| ACTRESS | H. Asama | RIKEN, 日本 | http://celultra.riken.go.jp/~asam |

系统的任务, 这包括编队 (formation)、觅食 (foraging) 与踢球 (soccer) 等。苏黎世大学生物机器人与群体智能^[23] 研究的目标一是对生物系统建模并从中学习, 譬如昆虫的导航行为或人类走路的动力学特征, 二是探索在一群交互作用的智能体中其结构的隐现。Nicoud 与他的研究小组^[24] 研究用自治机器人队伍来有效地完成预定任务的不同方法。他们定义了协调的机器人的活性的问题。受社会型昆虫所表现出的群体智能的启发, 他们把问题集中在导致鲁棒的、面向目标的, 而且可能是隐现的群体行为的机器人与机器人以及机器人与环境之间的交互之上。ACTRESS (基于演员的机器人和设备合成系统)^[1] 是一个设计用于不同类型应用的多机器人系统, 它着眼于通信问题。一般地, 机器人独立地起作用。但是如果需要, 它们能够彼此协商组成一个合作群体来处理具体任务。Mataric^[25, 26] 用包含形式的结构为多机器人系统构造行为^[27]。她已经构造了回归 (homing)、聚合 (aggregation)、散布 (dispersion)、跟随 (following) 与徘徊 (wandering) 等行为, 并且把它们应用在一个觅食任务中。

多智能体机器人技术的特别具有挑战性的任务是那些具有内在合作性的任务。迄今为止, 人们的研究主题已经包括:

- 多机器人路径规划^[28];
- 交通控制^[29];
- 编队形成^[30];
- 队形保持与控制^[31~33];
- 目标跟踪^[34, 35];
- 多机器人聚集^[36];

- 推箱问题^[37,38];
- 觅食^[8,12];
- 多机器人足球^[39~41];
- 探索^[4,42];
- 定位^[7,43];
- 碰撞避免^[44];
- 运输^[45,46]。

多智能体机器人的研究发展如此之快,以至于难以知道将会往哪个方向发展。作为参考,这里给出一些不时刊发关于多智能体机器人技术的杂志:

- *Autonomous Robots*;
- *Adaptive Behavior*;
- *Robotics and Autonomous Systems*;
- *Artificial Life and Robotics*;
- *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*;
- *IEEE Transactions on Robotics and Automation*。

除了这些杂志以外,还有许多关于最新多智能体机器人技术以及其他相关领域有关的国际会议:

- *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*;
- *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*;
- *International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB)*;
- *International Conference on Autonomous Agents*;
- *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*;
- *International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS)*;
- *International Symposium on Artificial Life and Robotics*;
- *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*。