

文章编号: 1002-0446(2001)04-0368-06

基于 MAS(Multi-Agent System) 的多机器人系统: 协作多机器人学发展的一个重要方向*

陈忠泽 林良明 颜国正

(上海交通大学电子信息学院 820 所 上海 200030)

摘要: 机器人的应用方式正在由部件式单元应用向系统式应用方向发展,这是实际应用的需要,也是技术发展的必然趋势;相关技术如计算机网络技术的发展也为它的实现提供了相应支持.多机器人协作理论问题必然也已经成为机器人学研究的一个热点,其中,分布式人工智能(DAI)中的多智能体(代理)系统(MAS: Multi-agent System)理论已引起多机器人协作理论研究者的关注.本文即在揭示协作多机器人系统与 MAS 的内在联系的基础上,指出基于 MAS 的协作多机器人系统是协作多机器人学发展的一个重要方向.

关键词: 多机器人系统;多智能体系统(MAS);协作多机器人学

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

AN APPROACH TO SCIENTIFIC COOPERATIVE ROBOTICS: THROUGH MAS (MULTI-AGENT SYSTEM)

CHEN Zhong-ze LIN Liang-ming YAN Guo-zheng

(No. 820 Lab, College of Electronics and Information, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

Abstract: The application mode of robots is changing from cell to system one, which is of the need of practice as well as the evolution trend of robotics. And correlative technologies such as computer networks offer a strong support to the realization of multi-robot system. Cooperative robotics has already become a most important field in robotics. Thereinto, theory concerning multi-agent system (MAS), which is a branch of distributed artificial intelligence (DAI), has attracted the attention of most researchers who are engaged in cooperative robotics. And in this paper the authors pointed out based on the comparison of the two domains that it is an approach to scientific cooperative robotics for us to use the theories and methodologies in MAS for reference.

Keywords: multi-robot system, multi-agent system, cooperative robotics

1 引言(Introduction)

进入九十年代,美国提出了敏捷制造这一新的制造模式,为适应这一模式的要求,其重要组成单元机器人必须以“系统方式”代替“部件方式”出现在敏捷生产^[6-7]系统中,机器人的应用方式正在从部件式的单元应用向系统式应用的方向发展.在机器人技术领域,多机器人的“协调(Coordination)”与“合作(Cooperation)”是应用迫切要求的结果也是技术发展的必然趋势:

- 通过多机器人的协作,可以完成单机器人难以完成的复杂作业^[1-2];

- 即使用单一的复杂机器人能完成该作业,在设计制造难度上该单一机器人远超过了可以完成该作业的多个简单机器人^[1-2];

- 通过多机器人的协作,可以提高机器人系统在作业过程中的效率;

- 当机器人工作环境发生变化或系统局部发生故障时多机器人之间通过其固有的自组织能力及协作机制重新确立协作关系,仍然可以完成预定作业;

- 可以利用已有的社会科学(如组织理论)、生命科学(如动物行为科学和心理学)及认知科学(如

人工智能等)的成果^[1-2]。

实际应用的迫切需要一方面给协作机器人技术大力发展提供了历史性的机遇,人们已作了大量这方面的工作,也取得了丰硕的成果,甚至已提出了协作机器人学的概念;同时也对它提出了严峻的挑战。从协作机器人学的观点看,它还处在相当初步的阶段:人们提出了它的方法论框架,但基本上局限于概念性的研究,缺乏严格的定义及形式化描述。可以说,协作机器人学要真正成为一门科学,还很长的一段路要走。

分布式人工智能(DAI)中的多智能体系统(MAS)的理论和方法,在协作机器人领域已引起了人们的普遍关注。本文在揭示多机器人协作与MAS的内在联系的基础上,将从方法论的角度阐述MAS理论及方法对协作机器人学发展所起的巨大借鉴作用。

2 多智能体(多代理)系统 MAS 的定义及特点 (The definition and characteristics of MAS (Multi-agent System))

2.1 智能体(智能代理)Agent

Agent(智能体或代理)的概念正被广泛地采用。人们对Agent的研究始于八十年代,起初的研究主要集中在它的学习能力方面^[3-4],近年在提高Agent的智能化水平方面取得了很大的进步,可以在一定程度上模仿人的行为^[5-6]。随着计算技术的出现,尤其是面向对象技术和基于规则编程^[7]技术的迅速发展,Agent模型越来越细化,结构越来越复杂,其智能化程度也愈来愈高,人们已研究成功具有自治及合作行为的Agent^[8-9]。如BDI模型^[10]就是其中一种最为重要的模型,它是一种语形和语意良好,理论较为完善的模型,它不仅能完成知识表示与推理,也描绘了影响Agent行为的心智状态,并刻划Agent的各种心智成分及其相互约束关系以及这些心智成分与其行为之间的相互影响。又有文献^[11]把BDI模型与情景演算^[12]的理论结合起来,构造了一个新的Agent模型,解决了BDI模型中存在的大量未解决的问题,如知识与信念的逻辑全知问题^[13-14],实现了BDI模型与实际Agent实现之间的连接,它既能表示Agent的心智状态又能进行行动推理和规划^[11]。

因而,Agent实质上是指能实现某一性能的计算机程序单元的模型,同时可以从更为抽象和普遍的意义作为复杂软件系统的分析、说明及实现的代名词。它以软件系统的形式作为人的智能的“代理”,

简称之为智能体。

作为智能的“代理”,Agent至少应有以下特性:

- 它能感知它所处的环境;
- 它能自主与其它智能体相互作用;
- 它能自主实现自己的局部目标。

智能体Agent作为人的智能的代理,它的智能最终是由人的智能决定的。人可以根据它所处的环境要求赋予它不同的特性,即具有相应的智能。

2.2 多智能体(代理)系统 MAS (Multi-Agent System)

Agent作为智能计算实体,能自主完成一定任务。但面对一些复杂的问题,如具有分布式数据或知识,或要求分布式控制的系统,不得不采用多个Agent协作系统。其中的每一个Agent可以具有不同的特性功能,在完成某一共同的目标的过程中扮演不同角色。其中Agent的协作关系是自发形成的,系统的功能不是单个Agent功能的简单和。这样的系统称之为多智能体系统(MAS: Multi-Agent System)。

MAS(Multi-Agent System)一直是分布式人工智能(DAI)领域研究的主要内容和热点^[15]。对MAS的研究可分成两个层次:一是关于MAS理论的基础研究,在这一层次上目前还缺乏较为系统、严格有效的MAS理论和方法;二是关于MAS特定的体系结构、Agent的软件实现等的研究^[15],人们已把面向对象的思想引入Agent对象体系中,并形成了面向Agent的编程(AOP: Agent-Oriented Programming)风范^[16],这是一种分布式对象技术^[17],相关的研究如^[18]。文献^[18]提出的合作多智能体框架是面向对象理论和人工智能概念的结合,它示范了“智能”体如何被用来组成“支持通讯协商,能自动完成分布式问题的协调合作求解”的框架。这个系统是用Prolog实现的,存在由Prolog带来的局限性,同时在这里问题的分解是由领域专家完成的。文献^[16]则建立了一个自治、交互MAS的Z++形式化开放混合体系结构模型,但它也没有考虑任务(服务请求)的自动分解问题,也没有协作冲突消除的操作,该模型还有待解决模型到面向对象程序设计语言的映射、系统原形的设计与实现等问题。

MAS研究所面临的问题有:

(1) MAS的结构(frame)和组织(organization)

MAS的组织 and 结构包括Agent的模型结构及Agent之间的组织形式,前者所要解决的问题是Agent元素及其组织方式问题,Agent之间的组织形

式则要解决各 Agent 在系统中如何相互分工合作及协调一致的问题, 以使系统成为一个层次结构清晰、运行效率高及鲁棒性好的多智能体系统. 为了使 Agent 能与其协作伙伴高效协作实现所期望的智能行为, 它的各元素之间应采取什么样的组织策略? Agent 的模型的构造有两种思路, 一种是从行为心理学出发的, 这种观点认为 Agent 毋需建立环境的内部模型, 智能也不是存在各 Agent 内部, 而是各简单计算单元相互作用的结果, 这样的 Agent 可以称之为反射式^[19] Agent; 另一种则是以 BDI(Believes, Desires, Intentions)模型为代表的形式化思路, 它把 Agent 有关的知识 and 能力都以形式化方式包含到其心智模型中. 另外, Agent 的模型结构与 Agent 之间的组织形式是密不可分的两个要素, 因为 MAS 中的 Agent 是社会性的 Agent. 个体 Agent 的社会性是他能与其他 Agent 对象的相互协作的内因, 这是从个体行为至集体(社会)行为所必须贯穿的.

对于 MAS 而言, 在 Agent 成为具有社会性的 Agent 以后, 它还需要能发挥其协作能力的外部(社会)环境. 单个具有社会性的 Agent 已经有了一定知识和能力(包括协作能力), 但仅此还不能实现与其它个体的协作. 单个的 Agent 不可能从集体的层面上理解、预测及支配系统所有行为的全局及综合效果, 它们之间还需要一种社会结构及合作机制, 该结构及机制可能是系统随机应变而生成, 并随着系统协作过程的推进通过进化选择机制或某种形式的学习而不断得到自组织优化.

(2) 精确地形式化(Formalization)问题

形式化描述即用一种具有语法语意的数学语言对一个系统及其特性进行描述的过程^[20]. 系统的特性可能包括功能行为、定时行为、性能特点或内部结构等. 其中一个描述可以集成多种描述语言以描述系统不同方面的特性.

将难以捉摸的概念进行严格地形式化是解决所讨论问题矢志追求的^[21]. 形式化描述要求设计者深入理解所描述的对象, 避免设计过程出现缺陷、矛盾、模棱两可及不完备等问题; 同时形式化有利于对系统进行形式化分析和推导. 它实际上是一种更高级的系统运行源代码, 是系统设计者与用户、设计者与实现者及实现者与实验者的沟通工具.

已有的形式化方法很多, 但没有一种适合用来描述和分析一个复杂系统的各个方面的特性. 如何对任务及协作系统做严格地形式化, 并使之与知识和软件工程的方法论如面向对象方法等相适应, 这

是 MAS 研究者首先要面对的. 从 Agent 的内部结构、进化机制至 MAS 的组织方式不仅需要连续系统的行为进行描述, 而且要对协作系统的行为做出规定, 要完成其形式化过程, 必须采用抽象复杂的数学概念, 集成各种形式化方法.

(3) 通讯(Communication)问题

即为了实现 Agent 之间复杂而有意义的相互作用, 它们可以采用什么协议进行通信? 一个协作的 Agent 处在一个开放的环境中, 它要通过网络等设备与别的 Agent 发生接触, 它还需要一种语言实现与别的 Agent 的沟通.

(4) 协作(Cooperation)问题

即各个自主的 Agent 通过什么机制实现任务的分工合作及步调的协调一致? 只要是多个 Agent 不得不在同一框架组工作, 为了寻找合适组织方式及实现通信, 相互作用就不可避免. 这意味着需要一个明晰的协作策略, 实行从任务的分解、分配到执行的协调一致的动态管理.

(5) 实现(Implementation)问题

为设计并实现 MAS, 需要那些技术和工具的支持? 如开发一种什么样的工具(如良好的可视化编程工具)来描述 Agent 的特性及各 Agent 之间的关系, 并把完整的 MAS 描述转化成它的正确、高效和鲁棒实现? 一个形式化的模型是人工用比高级算法语言更为高级的超高级语言对系统进行抽象的结果, 这相当于人的大脑形式的实现, 必须用合适的工具把 MAS 描述正确、高效和鲁棒地转化成更有意义的机器实现.

(6) 求证(Verification)问题

求证问题包括两方面的内容: 形式化模型的检测及形式化定理的证明^[22, 23]. 在形式化的过程中, 其形式化的有限模型是否完备? 这是模型检测的任务. 粗略的说, 它要判断模型是否能穷举状态空间的所有状态的问题, 算法设计和数据结构是其关键. 在形式化模型中, 系统及其期望特性表示为数学逻辑公式, 其中的逻辑包含一套公理和推理规则基. 从公理系统出发寻找系统特性公式成立的证据即定理证明.

在得到 MAS 的形式化模型后, 求证及调试修改 MAS 的形式化及实验方法是什么? 这是一个必不可少的环节.

智能的概念是如此之广, 可以说我们生活在智能化的时代; 智能的思想对我们的影响是如此之深, 以致于在考虑一个系统解决问题的能力的时候, 我

们常常从 MAS 角度出发. 那么 MAS 最适合应用到具有些什么特性的领域呢? 根据 MAS 的特点, 它适用的情形如:

- 分布式结构的对象 拟处理对象包括的异构实体或其数据及信息来源呈物理或逻辑分布;

- 复杂的计算 待解决的问题的计算很复杂, 但它能被分解为若干个子问题, 且这些子问题可以由各自的能利用局部数据或信息块及启发式策略自主求解的实体并行求解;

- 柔性的相互作用关系 问题求解过程不确定因而求解问题的任务不能预先分配给子求解器;

- 动态变化的环境 环境是动态变化的, 因而要求问题求解单元对此做出反应和适应性措施;

当待求解的问题具有以上特性(或它们当中的某一个或几个)时, 用 MAS 的理论或技术来处理是非常合适的.

3 多机器人的协调与合作及协作多机器人学研究的主要问题 (Coordination & cooperation among multi-robot systems and research themes for cooperative robotics)

机器人作为人类意志的产物, 机器人技术总是随人类自身的发展而发展.

随着人类社会的发展, 人的社会行为越来越复杂, 个体的人已越来越离不开社会了; 而个体人的社会行为的日益复杂又加速了人类社会的发展. 在人的社会性中有两个最基本的起推动作用的因素: 协调与合作. “协调”与“合作”是人类社会(也包括其它一些生物种群)存在的两个层次的群体行为. 这种群体行为在生物种群中无处不在, 在人类社会中尤甚; 它推动着物种的进化, 同时又随着物种进化而不断完善.

在机器人技术领域, 人们正是受上述思想的启发, 引入“协调合作”的思想, 并逐步形成协作机器人学. “协调”与“合作”在机器人技术领域正在表现出它的历史必然性.

那么, 从机器人技术的角度而言, 协调与合作这两个概念有些什么具体含义呢?

多机器人系统不是物理意义上的单个机器人的简单代数相加, 其作用效果也不是单个机器人作用的线性求和, 它应该还包括一个“线性和”之外的基于个体之间相互作用的增量. 这种个体之间的相互作用包含两个积极因素: “协调”与“合作”. 所谓“合

作”是指一个总体任务在个体之间如何分配, 即如何组织多个机器人去完成任务, 合作是通过机器人之间的组织方式及系统的运行机制实现的. 当合作关系确定以后, 还有一个要求各机器人在“合作”过程中相互之间运动“协调”的问题. 对于包含紧耦合子任务的复杂任务而言, 协调问题尤其突出. 因此, 相比“协调”, “合作”是更高层次的相互作用方式.

可见, 机器人通过协调与合作, 能够提高效率及增强能力.

实现多机器人的协作所要解决的问题有:

(1) 多机器人系统的结构

系统结构是系统的最高层部分, 多机器人之间的协作机制就是通过它来体现的, 它决定了多机器人系统在任务分解、分配、规划、决策及执行等过程中的运行机制及系统各机器人个体所担当的角色, 如各机器人个体在系统中的相对地位如何? 是平等自主的互惠互利式协作还是有等级差别的统筹规划协调? 任务分解、分配、规划、决策及执行等对某个个体而言是义务(即没有做与不做的决定权)还是权力(特权)? 总之, 正如社会制度之作用于人类社会, 它决定了多机器人系统的运作机制, 事关协作效率的高低.

从系统设计的角度而言, 系统结构要有利于个体能力最大程度的发挥和任务的最高效完成. 另外, 协作机器人系统面向的是动态变化的环境, 因而系统结构要对环境有自组织适应能力.

(2) 建模与规划

机器的智能大致可以通过两种形式实现: 其中一种是基于行为的方式, 采用这种方式时不用建立协作对象、环境及自身的状态及行为方式的模型, 其智能表现为一个反应式行为驱动规则基; 另一种方式则是建立在形式化模型的基础之上, 个体根据它建立的其协作个体和自身的心智状态及行为能力模型进行决策和实现协作.

规划则包括从全局任务级至局部(个体)行为动作级规划, 这些规划应能在自主个体之间动态进行, 以适应动态变化的系统和环境. 避免资源冲突也是规划过程中所要考虑的.

(3) 通信和商议

多机器人系统不是因为个体之间的信息交互而发生了相互作用, 是因为相互作用的需要而产生个体之间的信息交互. 它是实现多机器人协作的一种手段. 多机器人系统作为一种分布式信息及决策系统, 网络结构是其重要结构特征. 但它与以数据处

理和信息共享为目的的计算机通信有很大不同, 机器人不能过分依赖通信获取信息; 多机器人之间的通信也有别于 MAS 中 Agent 之间的通信, 因为物理上的限制, 前者更多地依赖网络。

通信是个体信息的交换, 而商议是有目的的信息交互. 商议是建立在信息交互的基础上的, 虽然机器人与 MAS 之 Agent 获取信息的方式有所不同, 但到了利用获取的信息进行商议这一层面上, 商议的策略是共同适用的。

(4) 感知及学习

感知是指机器人通过它的传感系统获取信息并经信息融合后加以利用. 不论是基于行为方式而是基于模型方式的协作, 感知都是必不可少的. 感知作为机器人与局部外界的一种交互, 对机器人而言与通信一样是机器人获取信息的一种方式, 它之作用于机器人如通信之于 MAS 中的 Agent.

制定控制策略对人而言是比较方便的, 但要确定控制参数, 机器做起来就快而且准, 因此为了系统获取理想协作行为的控制参数并使它适应动态变化的环境, 在系统中引入学习机制是非常重要的, 这与在 MAS 中学习机制无大区别。

(5) 系统的实现

参与协作的多机器人个体是高度自主且易于协作的, 整个系统应还有适应动态变化的环境的能力, 在控制器实现时, 这些都必须有相应的软硬件的支持. 它的实现与 MAS 的实现相比, 它们需要几乎相同的软件技术如编程工具、通信规范和协议等及硬件系统如计算机及网络的支持; 区别是由于多机器人系统本身固有的大量的物理设备, 它比 MAS 有更

多的通信和感知负担。

4 协作多机器人系统与 MAS 的内在联系及 MAS 对它的借鉴作用小结 (The inherent relations between cooperative robotics and MAS and its using MAS for reference)

诚然, MAS 与协作多机器人学的研究对象存在一定的差别, 如前者所讨论的对象面对的不确定性不如多机器人系统这样的真实物理世界中遇到的那样多, 此外, MAS 在研究 Agent 的时候, 对它的性能如感知和行为能力等做了理想化的假设, 这在实际的多机器人系统中是不大可能存在的, 但二者有着本质的联系, 机器人的行为(能力)是由它具有分析决策能力的“大脑”——软智能体(即机器人 Agent)决定的, 多机器人的协作策略也存在于各机器人的“大脑”中, 多机器人系统本质上由多机器人 Agent 系统驱动, 因而多机器人 Agent 系统可以与 MAS 有非常类似的拓扑结构、组织方式和运行机制, 只不过是二者的 Agent 的行为方式不一样。

MAS 对协作多机器人学的发展有巨大的借鉴作用. 值得借鉴的不只是 MAS 的一些具体的结论, 更重要的是它的方法:

- 借鉴 MAS 的 Agent 之形式化建模方法或反射式行为驱动策略, 构造机器人 Agent(机器人心智、行为及相关机制如决策和进化机制等的“封装”);
- 借鉴 MAS 的 Agent 之拓扑结构、组织方法, 建立多机器人 Agent 系统的框架;

表 1 协作多机器人系统与 MAS 的关系

Table 1 Compare between cooperative multi-robot systems and MAS

协作多机器人系统所面临的问题	可借鉴的 MAS 理论、方法
认知机器人心智、能力等的建模	社会性 Agent 之形式化建模(如 BDI)
机器人反射式行为驱动策略	Agent 之反应式(Reactive)行为规则
多机器人系统结构、组织方式及运行机制	MAS 拓扑结构、组织方式及运行机制
机器人个体之间的通信方案及商议策略	Agent 之间的通信协议及商议策略
协作多机器人系统的实现	MAS 的实现

• 借鉴 MAS 的 Agent 之通信协议及方法, 设计机器人 Agent 的通信方案(包括通信规范和协议及实施方案);

• MAS 的 Agent 的磋商和谈判策略, 在多机器

人 Agent 中基本适用;

• 借鉴 MAS 的系统实现方法, 实现协作多机器人系统;

协作多机器人学中可借鉴 MAS 的理论方法如

表 1.

积极地吸取 MAS 研究的成果(包括理论及方法), 是协作多机器人系统理论发展的一条捷径.

5 结论(Conclusion)

机器人技术在日新月异地发展, 机器人的应用方式正在从部件式的单元应用向系统式应用的方向转变. 由此向人们提出了新的课题, 如多机器人系统的组织结构及控制问题; 并形成了协作机器人学这一新的学科. 为促进该学科更快地发展, 使它真正成为一门科学, 有意识地结合相关学科的成果, 这里特别是分布式人工智能(DAI)中的多智能体系统理论应是一种基本思路. 应当说明的是, 我们不仅需要多智能体系统(MAS)理论和方法的一些具体结论, 更要注意吸取其方法论中的精髓.

参考文献 (References)

- 1 UNY CAO Y. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robotics*, 4/1997
- 2 Parker. Heterogeneous Multi-Robot Cooperation. www.ait.mit.edu/publications/pubsDb/search
- 3 Kufner. Software Agents will Make Life Easy. *Fortune*, Jan. 1994, 24: 72- 73
- 4 Maes. Agents That Reduce Work and Information Overload. *Communication of the ACM*, 1994: 37- 40
- 5 Fingar N. V. Etc. Multi-agent Coordination and Cooperation in a Distributed Dynamic Environment with Limited Resources. *AI in Engineering*, 1995, 9: 229- 238
- 6 Wang H. Etc. Intelligent Agents in the Nuclear Industry. *IEEE Computer*, 1997: 28- 34
- 7 Giarratano J C, etc. *Expert System: Principles and Programming*. Thompson International
- 8 Bose R. Intelligent Agents Framework for Developing Knowledge-based Decision Support Systems for Collaborative Organizational Process. *Expert Systems with Application*, 11/1996
- 9 Clements P E Etc. A Framework for the Realization of Cooperative Systems. *SIGOIS Bulletin* 15/1995
- 10 Wooldridge M, Jennings N R. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. *The Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115 - 152
- 11 李斌等. 基于行动理论的智能体模型. *南京航空航天大学学报*, 12/1999
- 12 Levesque H J etc. Foundations for Situation Calculus. *Link Electronic Articles in Computer and Information Science*, 1998, 3(18)
- 13 Elgot-Drapkin J etc. Reasoning Situated in Time 1: Basic Concepts. *Artificial Intelligence*, 1990, 2(1)
- 14 Cristiano Castelfranchi. Modeling Social Action for AI Agents. *Artificial Intelligence*, 1998, (103): 157- 182
- 15 Dunin-Keplicz B etc. Compositional Formal Specification of Multi-agent Systems [J]. *Lecture Notes in AI*, 1994
- 16 陈进才等. 多 Agent 系统的形式化开放混合体系结构模型研究. *西安交通大学学报*, 2/2000
- 17 陈仁际等. 分布式对象技术在多机器人系统中的应用", *机器人*, 1998, 11(6)
- 18 Bose R. CMS: An Intelligent Knowledge-based Tool for Organizational Procedure Modeling and Execution. *Expert Systems with Application*, 1995, 8
- 19 Brooks R. A Robust Layered for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, V. RA- 2(1)
- 20 Arret G. Formal Method Applied to Floating-point Number System. *IEEE Transaction on Soft engineering*, 15. 5(May)
- 21 Edmund M Clarke. Formal Methods: State of the Art and It's Directions. <http://www.comlab.ox.ac.uk>
- 22 Archinoff, G. Etc. Verification of the Shutdown System Software at the Darlington Nuclear Generating System. In *Intl. Conf. on Control and Instrumentation in Nuclear Installations*, Glasgow, Scotland, May 1990
- 23 Bjerner N Etc. STEP: Deductive-algorithm in Verification of Reactive and Real-time systems. In *Proc. of the 8th International Conference on Computer-Aided Verification*, Number 1102 in *Lecture Notes in Computer Science*, July 1996, 415- 418

作者简介:

陈忠泽 (1969-), 男, 博士生. 研究领域: 多机器人系统, 计算智能.

林良明 (1937-), 男, 教授. 研究领域: 机器人学, 仿生学等.

颜国正 (1961-), 国家 863 智能机器人专家组专家. 研究领域: 机器人学等.