

群智能在多智能体系统中的应用研究进展

段俊花 朱怡安 钟冬

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

摘要 群智能算法是受群居性昆虫群体的集体行为启发而设计的分布式问题求解方法,将它应用到多智能体系统,旨在提高系统的鲁棒性、灵活性和自适应性。以群智能在多智能体系统中的应用为线索,首先介绍群智能的核心机制,然后从多智能体系统通信机制、协作技术、学习问题及体系结构建立这几个方面总结群智能理论在多智能体系统中的已有工作。最后分析和讨论了群智能方法在多智能体系统应用中存在的问题,并提出今后的工作展望。

关键词 群智能,多智能体系统,Stigmergy,分布式协作,多智能体学习

中图分类号 TP18 **文献标识码** A

Recent Development of Application of Swarm Intelligence in Multi-agent System

DUAN Jun-hua ZHU Yi-an ZHONG Dong

(Department of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Swarm intelligence algorithm is a kind of distributed method originated from collective behaviors of social insects. Its application in multi-agent systems aims to improve the robustness, flexibility and adaptability. Taking the application of swarm intelligence in multi-agent system as masterstroke, this paper discussed the critical mechanisms of swarm intelligence, and then summarized and discussed current study works of swarm intelligence applied in multi-agent communication, multi-agent cooperation, multi-agent learning and multi-agent architecture. At last, this paper analyzed and discussed some problems in current research and showed some preliminary points.

Keywords Swarm intelligence, Multi-agent system, Stigmergy, Distributed cooperation, Multi-agent learning

群智能(Swarm Intelligence^[1], SI)是人工智能界近两年发展比较快的一个学术分支,它主要研究具有分布式控制、自组织和涌现的行为。群体智能源于对成群社会生物体的研究。自然界中,蚂蚁、黄蜂、蜜蜂等社会性昆虫都激发人类令人惊叹的灵感,这些生物群体显示如何将大量简单的个体通过交互产生集体的智能^[2]。这些自然群体具有高度冗余性、更强的抗扰动能力以及动态适应工作环境的能力。研究生物群体的社会行为,促使人们设计出高效优化算法和聚类算法。例如, Kennedy^[3]对鸟群飞行术的仿真研究导致了粒子群优化算法; Dorigo^[4]对蚂蚁的觅食行为的研究得出了蚁群优化算法; Bonabeau 等人^[5]根据蚁群的劳动分工机制开发了基于响应阈值的任务分配模型; Deneubourg^[6]等人根据蚂蚁在构建墓地时搬运死去蚂蚁尸体的行为提出了一种聚类模型。研究显示,在社会性昆虫同步控制的背后并不存在中心协调机制,然而从系统级层面看却是鲁棒、柔性、高度自适应的。

多智能体系统(Multi-agent System, MAS)由于具有自主性和灵活性,已经被人们广泛应用于各种复杂系统中。随着 Internet 的飞速发展以及无线通讯技术的进步,普适计算、家庭医疗护理和物联网等应用不断涌现,这些系统都面临着操作中的动态不确定性、环境异构性以及诸多突发事件的发生等问题。如何应用多智能体系统来解决当前动态不确定性系

统中的诸多问题,提高系统的灵活性、鲁棒性和自适应性,是当前多智能体系统研究面临的问题。

群智能给多智能体系统设计注入了更多新的理念,将群智能理论应用到多智能体系统的研究便是当今的一个研究热点。然而许多现实应用的多智能体系统并不像昆虫社会那样由大量简单个体组成,有的是由许多功能或行为上异构的个体组成的。如何让这些非群体的、异构的系统能像生物系统那样具有高度的鲁棒性和自适应性,是一个值得深入研究的课题。

1 群体智能理论介绍

Swarm Intelligence 这个词首先由 Beni and Wang^[1](1989)在元胞机器人系统中提出。1999 年, Bonabeau, Dorigo 和 Theraulaz^[7]在“Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems”中对群智能进行了详细的论述和分析,给出了群智能的一种不严格定义:任何一种由昆虫群体或其它动物社会行为机制而激发设计出的算法或分布式解决问题的策略均属于群智能。群智能的研究受到当今学者的高度重视, IEEE Congress of Evolutionary Computation 自 2003 年以来都设有专门的议题用以讨论蚁群优化和粒子群优化等群集智能方法及其应用。美国宇航局启动了 NASA 计划来探索宇

到稿日期:2011-07-20 返修日期:2011-10-18 本文受国家航空科学基金项目(20100753022),校基础研究基金(JC201121)资助。

段俊花(1979—),女,博士生,讲师,CCF 会员,主要研究领域为人工智能、多 Agent 系统, E-mail: duanjh@nwpu.edu.cn;朱怡安(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为并行计算、嵌入式计算;钟冬(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为服务计算、物联网。

宙空间,采用模仿群智能的宇宙飞船来探测火星等^[8]。欧共体连续多年分别资助了 SWARM-BOTS、ANTS、Virtual Swarmanoid、Swarmanoid 等项目^[9]来研究群智能、群体机器人及其应用。我国现在也非常关注群智能的研究,分别于2010年和2011年召开了两届 Swarm Intelligence^[10]会议(IC-SI2010和ICSI2011),许多与智能相关的会议中大多涉及群智能的专题。中国科技大学^[11]、哈尔滨工程大学^[12]、吉林大学^[13]、武汉理工大学^[14]等高校都开展了基于群智能的研究工作。

关于介绍群智能相关算法的文献^[15-17]已经有很多,这里不再赘述,本文重点介绍群智能理论中目前应用到多智能体系统设计的几个重要方面。

1.1 Stigmergy 机制

在研究群智能的时候,首先要关注的一个名词,即“Stigmergy”。“Stigmergy”这个词由 Grasse^[4]提出,原始定义是:“Stimulation of workers by the performance they have achieved”。Grasse 提出这个词最初是用来描述白蚁的筑巢行为,但后来这个词被许多昆虫研究者用来描述动物之间的间接通信机制。

Stigmergy 机制是指个体把信息素(希腊语叫 stigma)留在环境中,这些信息素对其同伴的行为有影响作用。多智能体需要交互时便会产生协作,这些协作可以是直接的或间接的。Stigmergy 机制就属于间接交互类。

Hadel^[2]指出,应用到多智能体协作的 Stigmergy 机制有两种:Sematectonic Stigmergy 和 Sign-based Stigmergy。其中,Sematectonic Stigmergy 机制是指环境中发生一些物理改变则会相应地刺激昆虫个体采取某些行动,如筑巢、搬运尸体、打扫巢穴等,而这些个体的行动也同样改变了环境,进一步促使更多的个体行动,从而最终完成任务。Sign-based Stigmergy 机制是一种昆虫个体间进行协作的信号机制,蚂蚁的觅食行为便是基于该机制的。目前研究较成熟的蚁群算法也是在此基础上得出的。

1.2 社会分工和任务分配

劳动分工是许多社会性昆虫的群体生活中一个重要而广泛的特征。在这些昆虫群落中,完成了一系列任务,包括繁殖、育雏、觅食、墓地组织、废物处理以及防御。而昆虫群落的任务分配与合作在大多数情况下并不受中央控制,尤其是对于大的群落来说。人们在研究中发现,社会性昆虫群体具有严格的分工,但这种分工却并非一成不变^[18]。有的分工基于年龄,如年幼的昆虫在巢穴内执行一些任务,年长的昆虫在外面执行觅食或防御工作。有的分工与昆虫的行为有关,如有外敌入侵时,在巢穴内执行清扫任务的蚂蚁会根据同伴的求救信号去执行御敌任务。还有许多任务分工现象,如年龄相同的蚂蚁,有的去执行防御或觅食任务,有的去执行食物加工和存储工作等。而它们是如何分工的,人类还没有彻底了解。

昆虫群落的社会分工引起了科学家的极大兴趣,生物界和计算机界的专家从各种角度来研究动物的分工机制。虽然动物的社会分工机制还没有被人类充分理解,但还是产生了一些有效的算法模型。反应阈值模型便是目前应用最广泛的一种。

Bonabeau 等人^[5]根据蚁群的劳动分工机制,开发了一种基于固定响应阈值的任务分配模型。该模型中,给每个蚂蚁

一个固定的任务响应阈值,阈值的大小可以反映个体对相关任务的刺激反应强度。环境中对每个任务赋予一个刺激强度,当一个任务的刺激强度超过了某个蚂蚁的响应阈值时,它就开始从事该项工作。蚂蚁的参与或退出都会对自身阈值和环境刺激产生影响,从而实现动态任务分配。

基于阈值模型进行社会分工和任务分配的研究工作已经开展了很多。Dorigo 团队在研究群体机器人系统中,应用阈值模型进行了任务的自组织分配和解^[19]。

1.3 基于群智能的系统建模

实质上,一个社会性昆虫群体毫无疑问也是一个分布式问题处理系统,是由许多相对简单的交互个体组成。这个群体每天要解决的问题是通过自组织的方式来完成,包括觅食、建设或扩展巢穴、个体中有效地分配任务、喂养幼虫、抵抗外来侵略等。然而在工程和计算机科学中可以找到很多相应的类似任务,如无线传感器网络、物联网以及云计算等应用领域与群智能系统有着非常大的相似性,是群智能理论较好的应用背景。社会昆虫的行为研究给我们提供了一个有力的工具,它可以把社会性昆虫的这些知识和技能转换到智能系统设计领域。

群智能系统具有这样一些优点^[20]:(a)个体不是目标驱动的,它们的行动是对环境的一种反应,而不是详细规划的结果;(b)个体是具有简单知识的个体,只有很小的记忆和行为动作;(c)整个系统是分布式控制的;(d)系统对个体的失败具有容错能力;(d)个体间不需要进行直接的交互。同样,这样的系统还有它不可避免的缺点:(a)难以从 agent 个体的行为来推测系统的整体行为;(b)设计完全基于群智能的系统比较困难;(c)系统中的一些参数的取值对整个群体行为有很大的影响。

Parunak^[21]介绍了基于群智能的多智能体系统设计应该遵循的原则:(a)agent 是独立自主的,它们是自主、分布式控制的;(b)agent 个体在质量、时间和范围上是比较小的;(c)agent 个体行为上应该简单且多样;(d)agent 个体必须能保存和共享自己从环境中获得的信息;(e)个体的规划和行为执行是并发的。

实际应用中,大多数多智能体系统并不是由大量简单同构个体构成的,所以要应用群智能思想设计非群体的多智能体系统具有一定困难和障碍。如何把具有较强鲁棒性和自适应性的群智能理论应用到多智能体系统中,还需要做很多工作。

2 群智能在多智能体系统中的应用

本文主要从多智能体通信机制、协作技术、学习问题及系统体系结构建立这几个方面的介绍来总结群智能理论在多智能体系统中的已有工作。

2.1 多智能体通信机制

通信是多智能体系统之间进行交互和组织的基础。传统意义上的通信是一种显式通信,对通信质量和通信效率有较高的要求,过多的通信常常会产生通信瓶颈问题。群智能的 Stigmergy 间接通信机制给多智能体系统研究者更多的启发,我们把它定义为隐式通信。

隐式通信可以分为两类:(1)通过改变外界环境实现通信。智能体通过某种方式在环境中留下某些特定信息进行信

息传递,在改变环境的同时也根据环境的改变调整自己的行为来达到与其他个体的协作;(2)通过自身感知来获得外界信息。智能体具有一定的感知,可以检测到一定范围内的信息,智能体之间通过彼此观察到的信息来进行自我分析评测、采取行动。Ducatelle^[22]设计的多机器人系统中,通过机器人上不同颜色的灯光来传递信息。在使用隐式通信的多智能体系统中,由于各机器人不存在相互之间数据、信息的显式交换,因此多智能体系统可能无法使用一些高级的协调协作策略,从而影响了其完成某些复杂任务的能力。

显式通信可以分为全局通信和局部通信。全局通信多采用广播方式发布消息,如同网方法中的信息发布者,如果通信频繁,常常会有通信瓶颈问题。局部通信是个体只向邻近个体发布消息,通过众多个体的局部通信来实现信息的传递,这种方式与群智能思想很类似。Ducatelle^[22]在他的实验中也采用这种机制进行机器人之间的通信来避免通信瓶颈问题。

如果将隐式通信和显式通信的优势结合起来,通过隐式通信进行 agent 之间的底层协调,在出现隐式通信无法解决的冲突或死锁时再利用显式通信进行协调加以解决。这样的通信结构既可以增强系统的协调协作能力、容错能力,又可以减少通信量,避免通信中的瓶颈效应。

2.2 多智能体协作技术

协作是多智能体系统研究中的一个重要问题,分布式自主多智能体协作是当前的研究热点。社会性昆虫群落是天然的分分布式自主多智能体系统,将群智能的方法应用到多智能体协作中是一种很自然的想法。

Brustchy^[19]在他的研究项目 Swarmanoid 中应用群智能的阈值模型设计了多机器人觅食行为。机器人通过自己的行为结果和环境的变化,自适应调整自己的阈值,自组织地进行任务分配并加以执行。Arcaute^[23]应用群智能思想设计了基于引力势场的多智能体任务分配阈值模型,将任务定义为引力场,对智能体有一定的刺激,智能体通过自己感受到的引力大小自适应地调整参与的任务,该引力势场模型可以应用到多种应用领域。Frison^[24]开展了基于群智能方法的自组织任务分解,并在仿真觅食试验中进行了验证。Hadeli^[2]等人基于 sign-based stigmergy 进行多智能体协作系统设计,并应用到制造控制系统中。Bonabeau^[4]等人应用阈值模型来解决快递公司邮递员配送问题,实现了某城区邮递员的自组织协调分配。国内丁澄颖^[25]提出一种基于蚁群信息素吸引模型的任务选择策略,各机器人根据与任务相关的信息素浓度来计算选择任务的概率,信息素浓度越大的任务被选择的概率也越大。

2.3 多智能体学习问题

自 20 世纪 80 年代末、90 年代初开始,多智能体学习 (Multi-agent Learning, MAL) 就引起了多智能体系统、分布式人工智能、机器学习等领域研究者的广泛兴趣^[26,27]。但由于智能体技术本身发展不成熟,多智能体学习的研究在理论和应用上一直没有重大突破,其研究思路仍局限于把以马尔科夫决策过程为框架的单智能体强化学习算法直接移植到多智能体系统中。

多智能体学习问题本身和群智能方法有着本质上的相似性。多智能体系统学习具有两个特点:(1)学习过程有多个智能体参与,每个智能体有自己的学习空间。多个智能体的整

体空间是相当大的,而且由于智能体之间存在交互,学习行为中的一些改变常常能引起宏观层面上不可预测的变化。(2) MAL 有多个学习者参与,每个个体都需要学习和适应其他个体的相关信息。

在群智能系统中,蚂蚁对信息素的访问便是一种学习,同时也遗留自己的信息素。这是一种和同伴的交互,在互相交互中相互学习,最后取得一致的成果。蚂蚁遗留的信息素会随着时间的推移逐渐蒸发,这样就不会让遗留太久的无用信息误导蚂蚁的行踪。Arcaute^[23]设计的基于群智能的多智能体协作系统中,通过个体执行任务的经验赋予个体学习和遗忘的能力。学习机制实质是一种强化学习机制,使得蚂蚁更易于选择自己曾经从事过的任务。而遗忘机制使得蚂蚁不会总是局限于某个任务,通过遗忘过去的经历而有了从事其他任务的可能性,从而达到对环境的自适应能力。Bonabeau^[4]的自适应阈值模型也是基于生物群体的学习机制改进的。

2.4 多智能体系统体系结构

多智能体系统体系结构研究目前国际上已经发展了许多方法,主要有以下几个方面^[28,29]:基于符号推理系统的体系结构、基于反应式控制的体系结构、混合式多智能体系统体系结构、其它方法如应用协进化计算来建立多智能体系统体系结构。在当前的网络环境中,让多智能体系统能像人类一样自组织分配任务、灵活适应不断改变的环境等,还需要不断从多智能体系统体系结构上进行改进。

应用群智能的方法从体系结构的角度建立多智能体系统,目前主要有两个方面的工作:一方面是应用群智能方法建立群体机器人系统,另一方面是应用群智能的思想来建立非群体的多智能体系统。

应用群智能方法建立群体机器人系统,是目前开展较多的工作,目前人们对群智能的研究实验也主要是用群体机器人开展的。Dorigo 团队一直致力于这方面的工作,我们国家的许多高校^[11-14]现在也都开展了这方面的工作。

应用群智能的思想来建立非群体的多智能体系统,目前开展的工作不多,是一个新兴的研究方向。Ferrante^[30]基于群智能的思想建立机器人群体的软件体系结构,为机器人建立行为工具集,主要是从模块化和代码重用的角度进行研究。张铃^[31]从生物进化的角度,将群体中的每只昆虫看成一个神经元,彼此之间通过连接组成一个神经网络,类似于人工神经网络模拟人类大脑,用“松散”的神经网络来控制整个系统,完成所需任务。

3 现有研究工作存在的问题

群智能方法是基于个体具有冗余性的系统。多数情况下,一个任务的完成需要个体通过一定时间的执行才能收敛到最佳状态,而且社会性昆虫的许多内部机制人类并没有完全弄明白。把群智能理论应用到多智能体系统还存在着许多问题和不足。

当前研究工作中存在的问题主要有:(1)应用阈值模型进行自组织任务分配时常常会出现冲突,部分任务有众多个体参与,而有的任务却无人问津。(2)群智能方法是基于群体行为的涌现性机制的,这样的系统比较难以设计和形式化分析,常常求得的是次优解。而且由于这种涌现行为是个体之间、个体和环境之间交互的结果,因此比较难于预测个体和整个系统的准确行为^[32]。(3)群智能方法是基于大量简单个体进

行分布式控制,而多智能体系统需要解决的问题有时比较复杂,应用时存在一定困难,尤其是异构多智能体系统。

群智能理论灵活应用到多智能体系统,需要注意以下几点:(1)在具体设计中要关注系统中个体必须执行什么样的行为以及需要什么样的交互来产生个体的行为和群体的行为;(2)要结合自身组织和涌现性理论,群智能方法本质上具有自组织性和涌现性,可以从研究自身组织和涌现的角度来剖析群智能方法;(3)灵活应用群智能方法,要注重群体智能解决问题的理念,不要局限于当前得出的几种群智能算法;(4)进一步探索群智能机制,进行群智能研究的一个可能途径是研究社会性昆虫如何分布式地执行某些特殊任务,对它们的行为进行建模,而目前对群居性昆虫的许多行为习性还没有完全了解,需要继续探索。

结束语 本文就群智能理论在多智能体系统中的应用进行了研究,从多智能体系统通信机制、协作技术、学习问题及体系结构建立几个方面进行了探讨。目前人工智能学科已形成3大流派^[33]:符号智能、计算智能和群体智能。智能可通过群体协同模拟。未来发展的重大课题是从群体智能和生态平衡中吸取营养,利用复杂系统和网络拓扑的研究成果,建立自协调理论。群智能在多智能体系统中的应用研究还处于刚刚起步状态,还需要不断丰富自身理论,在更多应用中予以实践。

参 考 文 献

- [1] Beni G, Wanf J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems [C]// Proceedings of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems. 1989
- [2] Hadeli, Valxkenaers P, et al. Multi-agent coordination and control using stigmergy[J]. Computers in Industry, 2004, 53: 75-96
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, 1995, 4: 1942-1948
- [4] Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithms and stigmergy[J]. Future Generation Computer Systems-the International Journal of Grid Computing Theory Methods and Applications, 2000, 16: 851-871
- [5] Pini G, Brutschy A, et al. Interference reduction through task partitioning in a robotic swarm[C]// Proc of 6th International Conference on Informatics in Control. Automation and Robotics, 2009
- [6] Deneubourg J L, et al. The dynamics of collective sorting: robot-like ants and ant-like robots[C]// Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior: From Animals to Animats. Cambridge: MIT Press, 1991: 356-363
- [7] Bonabeau E, et al. Swarm intelligence: from natural to artificial systems[M]. New York: Oxford University Press, 1999
- [8] Rouff C, et al. Verification of emergent behaviors in swarm-based systems[C]// Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer-Based Systems. 2004: 443-448
- [9] MarcoDorigo Website[EB/OL]. <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/HomePageDorigo/projects.php>, 2011-07-20
- [10] Online ICSI Web site[EB/OL]. <http://www.cil.pku.edu.cn/icsi2011/>, 2011-07-20
- [11] 冯春时. 群智能优化算法及其应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009
- [12] 刘佰龙. 群集智能理论及其在多机器人系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008
- [13] 杨茂. 群体机器人系统分布式协同控制方法与协同行为分析[D]. 长春: 吉林大学, 2010
- [14] 雷斌. 群体机器人系统合作控制问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009
- [15] 肖人彬, 陶振武. 群集智能研究进展[J]. 管理科学学报, 2007, 10(3): 80-96
- [16] 冯静, 舒宁. 群智能理论及应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 17: 31-34
- [17] 彭喜元, 彭宇, 戴毓丰. 群智能理论及应用[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1982-1988
- [18] Beshers S N, Fewell J H. Models of Division of Labor in Social Insects[J]. Annual Review of Entomology, 2001, 46: 413-440
- [19] Brutschy A. Task allocation in swarm robotics towards a method for self-organized allocation to complex tasks[R]. Brussels, Belgium: Universite Libre de Bruxelles, 2009
- [20] Krol D, Drozdowski M. Use of MaSE methodology for designing a swarm-based multi-agent system[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2010, 21: 221-231
- [21] Parunak H, Arbor A. Go to the ant: Engineering principles from natural multi-agent systems[J]. Annals of Operations Research, 1997, 75: 69-101
- [22] Ducatelle F, Forster A, et al. New task allocation methods for robotic swarms[C]// Proc of 9th IEEE/RAS Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions. 2009
- [23] Arcaute E, Christensen K, et al. Division of labour in ant colonies in terms of attractive fields[J]. Ecological Complexity, 2009, 6: 396-402
- [24] Frison M, Tran N, et al. Self-organized Task Partitioning in a Swarm of Robots[C]// Proc of 7th International Conference on Swarm Intelligence(ANTS 2010). Brussels, Belgium, 2010
- [25] 丁滢颖, 何衍, 蒋静坪. 基于蚁群算法的多机器人协作策略[J]. 机器人, 2003, 25(5): 414-418
- [26] Brazdil P I, et al. Learning in distributed systems and multi-agent environments[C]// Machine Learning — EWSL-91, 1991, 482: 412-423
- [27] Bowling M, Vrloso M. Multiagent learning using a variable learning rate[J]. Artificial Intelligence, 2002, 136: 215-250
- [28] Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems[M]. 石纯一, 张伟, 徐晋晖, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 63-73
- [29] 薛宏涛, 叶媛媛, 沈林成, 等. 多智能体系统体系结构及协调机制研究综述[J]. 机器人, 2001, 23(1): 84-90
- [30] Ferrante E. A Control Architecture for a Heterogeneous Swarm of Robots the Design of a Modular Behavior-based Architecture [R]. Brussels, Belgium, Université Libre de Bruxelles, 2009
- [31] 张铃, 程军盛. 松散的脑袋——群体智能的数学模型[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(1): 1-5
- [32] Sarker, Faruque M. O, Torbjrn S D. A robotic validation of the attractive field model: An inter-disciplinary model of self-regulatory social systems[C]// 7th International Conference on Swarm Intelligence(ANTS 2010). Brussels, Belgium, September 2010: 24-35
- [33] 何华灿. 人工智能学科的未来五十年[C]// 人工智能学科诞生五十周年暨中国人工智能学会成立二十五周年. 北京, 2006