

文章编号:1007-130X(2012)02-0159-09

复杂自组织系统的研究综述^{*}

A Survey of the Research on Complex Self-Organized Systems

郭毅¹,毛新军¹,董孟高¹,徐云青²

GUO Yi¹, MAO Xin-jun¹, DONG Meng-gao¹, XU Yun-qing²

(1. 国防科学技术大学计算机学院, 湖南长沙 410073;

2. 浙江衢州职业技术学院, 浙江衢州 324000)

(1. School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073;

2. Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China)

摘要:自组织系统是一类复杂系统,它通常驻留在开放的环境中,并且可以根据外部环境和内部状态的变化,通过系统成分之间的自主交互,对系统进行动态调整,从而更好地满足设计目标。近年来,随着计算机技术和 Internet 的不断发展,越来越多的计算机系统呈现出自组织的特征,有关自组织系统方面的研究变得非常活跃,受到学术界和工业界的广泛关注和重视。本文在深入分析自组织系统概念和特点的基础上,从理论模型、核心机制、关键技术、支撑平台四个方面对自组织系统的研究现状进行了综述和分析,介绍了其应用,讨论了自组织系统研究面临的问题和挑战,并展望了进一步研究方向。

Abstract: Self-organized system is a kind of complex system that is typically situated in an open environment and should adjust itself by interacting with each other in order to satisfy the design objectives. In recent years, with the rapid development of computer technology and the Internet, the research of self-organized systems is extremely active and has got many attentions from the industry and academic fields. This paper investigates the concept and properties of the self-organized system, surveys the state-of-the-art of the research on self-organized systems, from four viewpoints such as theoretical model, mechanism, pivotal technology, tools, its applications, the challenges and problems, are discussed and the future researches are prospected.

关键词:自组织系统;复杂系统;多 Agent 系统

Key words: self-organized system; complex system; multi-agent system

doi:10.3969/j.issn.1007-130X.2012.02.029

中图分类号: TP311

文献标识码: A

1 引言

自组织系统是一类复杂系统,其个体具有自主性,且通常驻留在动态开放的环境中。当环境或系统内部状态发生变化时,系统中个体按照一定自组织机制进行交互,从而使系统整体的结构、状态等

得到调整,进而满足系统对环境变化的适应及更好地实现设计目标。近年来,该方面的研究非常活跃,得到了学术界的高度关注。至今,人们已经在自组织系统理论模型、机制研究、自组织系统建模、开发方法、设计模式等方面展开了广泛的研究。研究人员正试图从更广的范围开展有关自组织系统的研究,包括自组织系统形式化规约、自组织机制

^{*} 收稿日期:2010-01-06;修订日期:2010-05-12

通讯地址:410073 湖南省长沙市国防科学技术大学计算机学院博士生队

Address: Doctoral Brigade, School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, P. R. China

的验证、建模和开发工具等。从2000年开始一些关于自组织系统的重要国际会议如SASO(International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems,简称SASO)、SOASCC(International Conference on Self-Organization and Autonomous Systems in Computing and Communications,简称SOASCC)等也相继召开。

然而,这类系统的开发也面临着一些新的问题和挑战,人们对自组织概念的理解和认识不尽相同。构建自组织系统的工程化方法还未成熟。本文旨在综述自组织系统的研究现状,分析其面临的问题和挑战,展望其研究和发展方向。

2 自组织系统的概念和特点

2.1 什么是自组织系统

自组织现象在自然界广泛存在,例如蚂蚁在构建巢穴时通过释放出一种具有特殊气味的物体相互联系,每只蚂蚁仅仅是按照气味的浓度和材料堆积的密度自行选择材料放置位置,最终能建造出结构复杂的巢穴。然而在蚂蚁的大脑中并没有关于建造巢穴的计划和控制机制,蚁巢完全通过蚂蚁自发的局部的行为形成。人类社会同样也具有自组织特性。人类通过长时间进化,从原始群居发展为具有严密组织结构的人类社会,就是自组织的过程。在这个过程中没有人类以外的因素对组织结构的形成进行干预。

然而尽管人们对自组织的研究已有时日,但由于从不同的角度出发,研究的背景、动机和手段各不相同,不同的研究者对自组织概念有不同的理解,下面对几个具有代表性的概念进行介绍。

(1)Prigogine从热力学及系统能量的角度对自组织概念进行了阐述^[1],认为自组织系统是一个远离平衡态的开放系统,它通过不断与外界交换物质和能量,同时系统内部存在强烈的非线性作用,在外界条件变化达到一定阈值的时候就会从原来的无序状态转变为有序的状态。

(2)Haken从系统中个体交互的协同性出发^[2],认为自组织系统的自组织特性是由个体之间的协同交互导致的。在交互的过程中,每个个体存在自发地倾向从无序的运动到个体之间关联而引起的协调合作的运动。同时用“序参量”来刻画系统的有序度,序参量通过个体竞争和协同产生,也支配着个体的运动方式。

(3)在计算机科学中,Wolf T D的定义比较有

代表性^[3],他认为自组织是系统的一个动态的适应过程,在该过程中系统在不外界控制的情况下,通过自身内部个体的交互,获得或维持一定的结构。其中“结构”指时间、空间或功能上的一种结构。这一定义主要从系统的外在特征上与涌现现象的概念进行了区分,强调了自组织的动态过程。

本文认为,自组织是系统的一个自我调整过程,整个过程通过系统内部个体自主交互形成,没有集中控制。以蚁群为例,蚂蚁个体活动时总是在沿途留下信息素,而其本身又总是向信息素浓度大的地方活动,信息素充当了蚂蚁之间交互的介质,通过这种交互方式蚁群最终能够建造出复杂的巢穴或找到搬运食物的最佳路径。这个过程就是自组织的过程。当我们在构建复杂信息系统时,也可以借鉴这一思想,将系统内部的构件设计为可以相互交互的自主个体,通过设计个体行为及交互方式实现对复杂系统的设计。

2.2 自组织系统典型案例

我们通过自组织无线传感器网络的例子来说明自组织系统及其特点。

该系统由一组可以进行互联的传感器组成,传感器可以对环境中的数据进行采样,同时可以在一定范围内与其他传感器建立连接并且可以相互传递数据。每个传感器都有一定生命周期。一开始,传感器被随机部署到一定环境中,在传感器采集一定数据后需要将数据传递到某一指定节点,但每个传感器所能通信的距离有限,此时为了能使每个节点尽可能传递数据同时又使整个系统尽量延长工作时间,这些节点会自主地在有限的范围寻找可连接的对象。最终整个系统通过自组织形成具有一定拓扑结构的网络。这个网络中每个节点既是信息采集节点又是其他节点传递信息的中继。此外,系统的结构还可以因个体的工作情况而改变。例如,当某个节点电量耗尽时和它相连的其他节点就会切断和它的连接,同时寻找其他可用的节点进行连接。

2.3 自组织系统的特点

根据自组织系统的概念定义可以发现,自组织系统一般具有以下复杂性特点。

(1) 驻留环境的开放性。

自组织系统通常驻留在开放的环境中,环境的变化不受系统控制并同时系统的演化产生影响,系统需要通过不断调整和组织以适应环境变化。案例中传感器部署的环境是事先未知的。

(2) 系统演化的适应性。

系统总是向适应环境变化的方向调整。即演化的方向总是向系统适应环境变化而拥有的一种时间、空间、功能上的格局。

(3) 系统个体自主性,无集中控制。

系统中的个体都是自主的,不受其他个体控制。案例中每个传感器选择连接对象,选择工作/休息时间都是自主决定的。

(4) 涌现性。

它是指系统通过内部元素的交互在整体上系统产生了新的属性、特征、性质、结构等等。这些新特性无法从单个元素中体现。但是,目前人们对涌现和自组织的关系看法不一。并且认为自组织系统不一定会出现涌现。本文认为产生这一偏差的主要原因是人们对涌现的定义还存在差异。当将涌现看作是自组织过程的结果时涌现性可以认为是自组织系统的一个特性。

3 自组织系统研究现状

3.1 研究现状概述

人们很早就注意到自组织现象,早在 1959 年 Grasse 对蚁群筑巢和觅食行为进行了研究^[4],他将这一现象称为“stigmerge”,这一现象后来被很多自组织系统机制设计所借鉴。70 年代开始,Prigogin 从热力学角度,对自组织系统能量的吸收和耗散与组织有序之间的关系进行了研究,创立了耗散结构论^[1]。随后人们又从不同的角度对自组织进行了研究,试图解释系统是如何自主地从无序走向有序的。最终,形成了以耗散结构论、协同学、分型学、突变论为代表的自组织理论群。

90 年代中后期,人们意识到在人工系统的设计中也可以采用自组织的方式使系统更加智能。这期间,圣塔菲研究所等研究机构及学者对人工生命、自适应人工系统、人工系统的群体智能(Swarm Intelligence)进行了深入的探讨。但是,这些研究主要从系统论的角度进行而且受到人工智能的影响,并没有从系统开发的角度进行更深入的研究。与此同时,一些研究人员也开始将自组织的思想引入到一些相关领域的研究。如 Holland 提出群体机器人采用蚁群的 Stigmergy 自组织方式来完成相关任务^[5]。Resnick 提出采用自组织的方式设计交通控制系统^[6]。Caro 提出在网络数据包的交换过程中可以采用蚁群觅食机制的自组织方式应

对无法预测的网络拥塞状况^[7]。这些研究为解决相关领域的问题提供了新的思路。进入 21 世纪,随着 Internet 及各种信息技术的日趋成熟,信息系统的特征发生了很大的变化,系统规模越来越大、复杂性越来越高。在这种背景下,自组织系统的开发得到了广泛的关注。一些大学和研究所,如德国人工智能研究中心、意大利博洛尼亚大学、法国里昂大学等纷纷展开了自组织系统的研究工作,并取得了一定的研究成果,同时也涌现出了一批有影响力的学者,如 Zambonelli、Hassas、Tom Dewolf、Carlos、Tianfield、Picard 等。他们一方面借鉴生物系统、人类社会等复杂系统的自组织现象,对自组织系统的运行机制进行了深入的研究。另一方面,从现有的技术手段出发,对系统设计建模等问题进行了探索,在开发方法上也提出了新的思路。概括起来,目前自组织系统的研究大致可分为以下四个方面:

(1)理论模型:构建自组织系统软件的理论模型和设计框架。

(2)核心机制:探索发现支持系统运行的各种自组织机制。

(3)关键技术:提供支持自组织系统开发的关键技术。

(4)支撑平台:支持自组织系统开发和运行的平台。

3.2 理论模型

随着自组织系统应用研究的开展,对支持系统开发的理论研究需求越来越大。与此同时,MAS (Multi-Agent System,简称 MAS)理论为自组织系统研究提供了有力的工具,两者的结合为自组织系统理论研究和 MAS 的研究都起到了推动作用。文献[8]讨论了不同的观察尺度下 MAS 系统设计与分析所面临的挑战。这标志着 MAS 的研究从原来关注微观层面的问题转向关注宏观层面的问题和系统的微-宏观联系,自组织成为 MAS 研究的重点之一,已有的理论模型研究大多借鉴了 MAS 的思想。

表 1 列出了有代表性的理论模型,已有的自组织系统理论模型可以分为基于涌现的和基于组织调整的。前者是在生物系统等复杂系统特征基础上构造的 MAS 模型。这种模型没有一个显式的组织结构,通常没有控制全局或进行任务分配、规划的 Agent。每个 Agent 往往只有局部视角,只关心自己周围的环境和相邻的 Agent,Agent 之间甚至没有直接的通信。系统的设计目标是依靠涌现

来完成的。基于组织结构的模型往往具有一定的结构或层次,如 Sebastian 等人的工作^[9],系统通过 Agent 交互形成一定组织结构,自组织是通过对组织结构或 Agent 扮演的角色调整实现。理论模型的研究成果为自组织系统的开发提供了可以借鉴的依据和框架,同时为自组织机制的设计提供了描述的平台。然而这类工作多数仅停留在模型的建立和描述,对于开发的支持还略显不足,例如缺乏一定的建模技术支持。此外该类工作大都缺乏形式化的描述,使得模型的自组织过程缺乏严格的操作语义。

表 1 自组织理论模型

作者	主要工作	主要特点
Sebastian	HMAS 模型	采用 holon 结构、免疫机制及组织概念
Zambonelli	TOTA 模型	采用中间件技术,个体非直接交互
Mihaela. U	E-Logistics 系统	采用 holon 结构、stigmergy 机制
Shabtay	Bahaviosite 模型	寄生虫机制
Harmon	Self-tuning 模型	采用策略引导,个体自我学习
Picard	自组织系统框架	适用于多种机制的自组织系统框架

3.3 核心机制

自组织机制是指导系统中个体行为的原则与约束,不同的机制会导致系统出现不同的特征、性质。我们认为可以从三个方面对自组织机制进行理解:(1)机制的构造特征,即系统的内部构造特点及构造体之间的关系,这是机制运行的前提和静态特征;(2)机制的运行机理,即系统在运行过程中各构造体之间是如何相互影响的,这是机制的动态特征;(3)机制的功能,即通过该种机制的作用系统能够达到怎样的运行状态。因此,对于自组织系统的构建,实际上就是按照机制的要求使系统的内部构造具有某种特征,并在运行时依据机制的运行机理相互影响。而对于选择何种机制,则与欲解决的问题相关,现有的自组织机制大多借鉴于生物系统和人类社会。其中具有社会性的昆虫(Social Insects),如蚂蚁、蜜蜂等的一些行为如觅食、筑巢得到了广泛的关注。文献^[10~12]描述了基于生物系统一些现象的自组织机制,人类社会的一些现象如流言、信誉等也被用于描述自组织的机制^[13~15]。文献^[16]从生物系统和人类社会总结了可用于自组织机制的现象。表 2 列出了借鉴于生物系统和人类社会的主要自组织核心机制。研究人员还以

MAS 为手段对现有机制进行了分析。Mamei 等^[17]从不同角度对机制中的交互进行考察。文献^[18]从五个方面对 MAS 自组织机制的应用及优缺点进行了分析。文献^[19]从完全分散控制和部分分散控制的角度对自组织 MAS 进行了讨论。Picard^[20]将自组织 MAS 的框架分为群体型和引力场型。这些研究从各个角度对现有的借鉴于自然界和人类社会的自组织机制进行了深入的研究和总结,为理解自组织机制和设计具有自组织能力的信息系统提供了有力的依据。人们还根据信息系统特点设计相应的自组织机制如 TOTA^[21]、Tag^[22]等。

表 2 自组织机制

机制	思想和特点	应用领域
Stigmergy 机制	个体独立自主工作,能够改变环境,环境的改变影响其他个体的行为。	工业自动化控制;移动自组织网管理
强化机制	个体的工作效率随着经验的增长而提高,由于具有越来越多的工作经验,个体对相关刺激的阈值的要求降低。	移动自组织网路由
免疫机制	抗体可以识别出抗原并产生新的抗体,通过刺激/抑制形成抗体网络,抗体网络通过抗原的数目调节抗体数量。	普适计算
流言机制	个体的行为取决于所掌握的信息,相邻个体进行信息交流和更新,使得系统内的全局信息可以实现共享。	P2P 传输协议
信誉机制	信任者对被信任者信任程度的度量,个体的信誉高低的度量,信任者对被信任者的传播,在已有的信息和判断的基础之上更新信任度和信誉值。	P2P 系统;虚拟计算环境

3.4 关键技术

由于自组织系统具有个体自主性等特点,传统的开发手段开发这类系统时会面临一些问题,如自主个体的抽象、机制的设计、演化的判断等,所以支持自组织系统开发的关键技术引起了研究人员的注意。尽管目前对自组织系统的开发还没有形成成熟的方法和统一的观点,但人们在一些关键技术上也进行了有力的探索。

(1) 建模方法。

一般地,建模需要提供一组建模概念,规范建模活动和过程、设计建模语言等工作^[23]。现有的工作多数关注建模概念和建模语言,这些工作大多在 UML 和面向 Agent 建模语言的基础上扩展而来。如文献^[24]中的 Belief-based Goal Processing 模型包括信念、目标、行为、角色,动机、信念强烈程度,并在此基础上提出 INGENIAS 建模语言,该语言在 UML 的基础上进行了扩展。文献^[25]对

UML 元模型进行了扩展,包括环境、环境状态、Agent、Agent 状态、事件(包括触发、移动、反射、通信、发射)。对于类的定义,扩展了输入事件、输出事件。Mirko 等人提出了 TROPOS4AS 建模方法^[26]。文献[9]采用 HOLON 的方法对系统进行组织建模。从内容上看,这类工作大多是对 AOSE (Agent Oriented Software Engineering, 简称 AOSE)中的建模工作进行扩充,使 Agent 具备了更强的适应能力,如添加了 Agent 在追求目标失败时的策略。然而这类工作并没有从根本上摆脱 AOSE 方法对自组织系统开发支持的天然不足,即过于关注系统中个体行为的建模而忽略了自组织系统存在的宏观特性。

(2) 开发方法。

现有的开发方法从软件生命周期的角度对开发自组织系统的行为进行了规范和建模,这类工作大都借鉴已有的开发方式如统一过程等,经过需求分析、设计、实现、测试几个阶段。表 3 列出了具有代表性的工作,例如 Wolf 的工作^[27]在传统的开发方法上加入面向自组织应用的分析,在设计阶段进行自组织机制设计等,与此类似的还有 ADELFE 方法^[28]。

表 3 主要开发方法

作者	工作	特点
Wolf	全生命周期方法	在 UP 的基础上进行改造
Bernon	ADELFE 方法	以面向对象技术为基础
Carlos	开发方法学	从复杂系统角度分析
Serugendo	开发框架	提出构建自适应和自组织系统的工程化需求,将开发活动进行建模

这类工作从方法学的角度为自组织系统的构建提供了支撑,包括各种开发活动,但是普遍缺乏支持开发活动的具体技术与方法,例如 Serugendo^[29]的框架中仅仅对建模活动进行了说明,但未提供具体的建模方法,使得这类工作显得比较空洞。

(3) 设计模式。

设计模式是一种重要的软件重用模式,受到很多软件设计者的喜爱。在自组织软件的设计中,也有学者对它的设计模式进行了总结。Wolf 等^[30]从众多的自组织应用中总结出了主要的自组织模式,并对适宜解决的问题进行了总结,还对设计模式的描述框架进行了约定。Gardelli^[31]在上述工作的基础上从更高的抽象层次也提出了相应的设计模式和模式描述框架。

可以看出,自组织系统设计模式是对自组织机

制及其用于解决有关问题的规范描述。这些描述向自组织系统设计提供了借鉴的框架与机制,是非常有意义的。随着自组织应用的不断增多,这些模式框架应该不断得到增加与完善,最终形成一整套成熟的规范。

3.5 支撑平台

开发的支撑平台是帮助系统设计人员快速、有效地对系统进行建模、开发的软件平台。由于现有的自组织系统支撑平台受到基础理论、开发关键技术因素的限制,还不是非常成熟,目前大致可以分为三类:基于 MAS 的开发平台、面向自组织涌现仿真的平台、特定领域的开发平台。表 4 列出了比较有代表性的工作。

表 4 自组织系统开发平台

名称	开发者	说明
VAstudio	中科院	面向 Agent 的自组织开发平台
AgentBuilder	IntelliOne	工具套件
MASDK	圣彼得堡学院	基于 Gaia 方法的平台
Netlogo	美国西北大学	面向自组织涌现的仿真平台
Swarm	Swarm 开发小组	面向自组织涌现的仿真平台
DIET	英国电信	移动通信领域自组织系统开发平台
AGiIP	中科院	面向网格计算的自组织系统开发平台
Anthill	博洛尼亚大学	面向 P2P 系统的自组织系统开发平台

(1) 基于 MAS 的开发平台。

这类平台以面向 Agent 的开发方法如 Gaia、MASE 等为依托,结合一定的 Agent 体系结构和规范,进行系统设计。如 VAstudio^[32],该平台提供了 Agent 行为库、策略接口、服务接口等支持 Agent 组织的设计,并可以用 AUML 对系统建模。AgentBuilder^[33]提供了一个图形化的开发工具支持从个体到组织的开发,个体包括信念、承诺、行为规则、行为等要素。MASDK^[34]是基于 Gaia 方法开发的平台,它支持 MAS 全生命周期的开发。

(2) 面向自组织涌现仿真的平台。

这类平台以自组织机制检验为目的,提供对机制描述和建模的语言和仿真平台,使研究人员可以观察系统的运行结果和涌现现象。如 Netlogo^[35],但其模型并不支持精化和开发。用户可以自行设计运行时可调节的系统参数,在模型设计好后通过调节相应参数观察涌现现象的变化。

(3) 面向特定领域的开发平台。

这类平台一般是某个领域的研究人员结合该领域构建的专用的自组织系统开发平台。例如

DIET^[36]是英国电信用于移动通信领域的开发平台。AgrIP^[37]是面向网格计算系统的开发平台。Anthill^[38]是P2P系统开发平台。

4 典型应用

自组织系统目前引起了很多领域研究人员的注意,人们试图利用自组织的方式解决那些用集中控制难以解决的问题,如表5所示。

表5 自组织系统典型应用领域

研究领域	解决的问题
普适计算	海量数据处理
P2P网络	资源寻找
网格计算	任务负载均衡
多机器人控制	机器人合作机制
数据库管理	数据存储
网络安全	入侵检测

(1) 普适计算。

随着技术的发展,普适计算的节点计算能力越来越强,体积越来越小,成本相应降低,可以大量部署。但随着节点数的增多,如何处理海量数据成为新的问题。此时可以采用数据自组织的方式,例如文献[39]提出一种分层结构思想,将普适计算的运算结果最终以服务的形式为用户提供。其中底层是大量异构的信息,信息数据之间利用自组织机制相互作用,以涌现的形式为上层提供服务。每一层之间都采用这种方式,最终用户感受到的服务即通过信息数据自组织产生。

(2) Peer-to-Peer网络。

P2P系统目前得到越来越多的应用,由于系统每个节点都是对等的,不存在集中控制,因此可以将其看作自组织系统,借鉴生物系统或人类社会中的某些机制解决其中存在的问题。如信誉、信任是人类社会的一种现象,可以利用这种方式解决P2P系统中的服务欺骗和节点资源滥用的问题,文献[40]对这种模型进行了总结。此外,Anthill^[38]则是利用蚁群的“stigmergy”机制解决资源查找问题。

(3) 数据库管理。

当数据库的数据量增加到一定程度时,传统的数据库管理模式无法很好地控制这些数据,对如此巨大的数据来说,对数据库管理系统提出了很高的要求。Weikum等^[41]利用一些载体自主地运送这些数据,这些载体总是在寻找拥有和自己携带相同类型数据的地方,一旦发现,就将数据运送到

那里。这一思想与自然界中昆虫排列虫卵的机制非常相似。

(4) 多机器人控制。

在机器人控制中,自组织主要应用于多机器人之间的协作。有效的协作机制可以极大地提高多机器人的运行效率,特别是对于工作在未知且动态的工作环境中的系统。例如在探索未知环境的群体机器人,采用生物系统的stigmergy机制进行合作,在设计不但可以只考虑机器人具有局部的视角,又能保证在机器人之间没有直接通信的情况下完成任务。

除上述关键应用研究外,自组织系统在普适计算、网格计算、网络安全,商业及制造业的自动化等领域中都受到了高度的重视,文献[17,18]对这些领域的自组织系统研究进行了介绍。

5 问题和进一步研究

尽管自组织系统研究已经取得了一些进展,但从理论研究和系统开发的的角度看还存在一些问题,对于大规模的应用和开发还有很大距离。

理论方面,现有的MAS的相关理论如Agent个体自主计算理论、个体模型和逻辑、组织理论、Agent程序设计理论等为自组织系统设计提供了可以借鉴的基础。但这些理论通常是从人工智能和分布式人工智能的角度来研究Agent的计算机理,针对特殊领域的应用开发需求,并且做了许多技术假设,缺乏有效的工具的支撑。同时,对于自组织系统的设计缺乏宏观上的支持包括系统宏观描述和性质验证等。人们期望将来能够在大规模复杂系统的设计中更多的采用自组织的思想,但目前真正面向自组织的形式化规约、验证和模型检验等方面的研究却并不多。基础理论的研究对于自组织系统开发非常重要,他们将为自组织系统的工程实践技术以及工具的研究提供理论指导并奠定理论基础。

关键技术方面,尽管许多面向自组织系统的建模都借助于组织学和社会学的思想和概念来对系统进行建模和分析,但缺乏相关的方法来指导如何利用和集成这些学科的思想 and 概念设计和开发面向自组织的软件系统。此外,现有的开发方法和设计思想还较大地依赖于传统的软件开发,我们认为自组织系统是一种不同于传统的集中控制式的系统,它的开发设计方法必然与传统的方法有较大差别,是一种自底向上的开发模式。我们要借助于生

物学、社会学、组织学、认知科学的思想来研究、设计这种系统,并归纳总结出各种设计模式及重用的方法,这对自组织系统的大规模应用非常关键。

支撑平台方面尽管已有一些研究成果,但依然有很多不足:基于 MAS 的开发平台大都以具有显式组织结构的 MAS 为基础,对于基于群体模型的自组织系统支持非常不够,而这类模型在自组织系统中又有很大的价值;面向涌现仿真的平台,仅可以对系统的自组织机制建模和检验,不支持系统开发;面向特定领域的开发平台缺乏通用性。该方面的研究还要依赖于基础理论和关键技术的研究成果。

为克服以上问题以及对自组织系统大规模应用打下基础,未来应从以下几个方面对自组织系统做进一步的研究:

(1)自组织软件开发的理论和技术。理论方面可以借鉴于生物学、人类社会等一些特点从宏观和微观两方面对系统及其性质、机制进行抽象和规约,为系统的设计和验证打下基础。在技术方面,希望能够建立统一的面向自组织系统的建模语言。它需要权衡语言的表达能力和简洁性,具有形式化和半形式化的语义基础,体现多视点、多抽象层次的思想,提供相应的语言设施来表征基于自组织系统的特点,能够有效支持复杂自组织系统的建模等等。建模过程方面,需提供良定义的过程来支持面向自组织系统的开发。尤其是在开发过程中往往会产生不同抽象层次和视点的系统模型,而许多模型在逻辑上是相关的,为此需要提供相应的技术手段来支持模型的变换和一致性的检验。

(2)自组织系统涌现性分析。自组织系统具有个体自主性,在无集中控制的情况下可能会产生涌现性并且可能是难控的。因此,在系统设计时应考虑涌现分析。目前由于自组织机制大多从自然系统借鉴而来,其涌现特性可以从自然系统中观察到,因此在缺少涌现分析的情况下系统也能很好地工作。但是,涌现性分析正逐渐被重视,例如 Wolf 等人不仅强调了系统设计中涌现性分析的重要性,而且给出了一种科学的分析方法。随着自组织机制的丰富,在无法预测涌现结果的情况下需要对涌现性进行分析,此外还要建立对系统运行或仿真运行后涌现结果进行分析评估的一套方法和机制,以确定系统涌现结果是否达到设计目标。

(3)自组织系统性质验证。系统验证的主要工作是判断自组织系统能否在一定机制引导下完成系统目标。一种验证方式是形式化验证。但是,有

些学者认为自组织系统由于交互的情况过于复杂,因此能否形式化验证目前还存在争议。另一种方式是模拟或实际运行观察。但这种方式很难为系统运行的效果给出精确的结论。文献[13]的验证方式虽然可以对系统的宏观性质进行验证,但并没有真正反映出系统个体在自组织机制支配下的运行特征,只适合于具有涌现特征的系统宏观性质验证。因此,寻找合适的系统验证方式也是下一步需要解决的问题之一。

6 结束语

本文在介绍自组织系统概念、特点的基础上从相关理论、系统模型、分析与设计方法和应用的角度对自组织系统的研究进行了总结,并讨论了目前所面临的一些问题和下一步研究的方向。我们认识到,随着信息系统面临的环境日趋复杂及自身复杂性不断增加,传统的设计、开发、控制手段越来越难以满足需要,自组织系统的提出为解决这些问题提供了很好的思路。然而,从基础理论和开发技术看还有很多不足之处,无法支持大规模的开发设计。随着各种技术手段的进步以及关键技术的突破,这些问题会逐步得到解决,自组织系统将会得到更多的应用。

参考文献:

- [1] Prigogine I. Time, Structure, and Fluctuations[J]. Science, 1978, 201(4358):777-785.
- [2] Haken H. Synergetics: An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology [M]. Springer Verlag, 1977.
- [3] Wolf T D. Emergence and Self-Organization: A Statement of Similarities and Differences[C] // Proc of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications 2004: 96-110.
- [4] Wilson E O. The Insect Societies[M]. Harvard University Press, 1971.
- [5] Holland O, Melhuis C. Stigmergy, Self-Organisation, and Sorting in Collective Robotics[J]. Artificial Life, 1999, 5(2):173-202.
- [6] Resnick M. Turtles, Termites, and Traffic Jams[M]. MIT Press, 1994.
- [7] Di Caro G, Dorigo M. Ant Colonies for Adaptive Routing in Packet-Switched Communications Networks[C] // Proc of PPSN V-Fifth Int'l Conf on Parallel Problem Solving from Nature, 1998:673-682.
- [8] Zambonelli F, Omicini A. Challenges and Research Directions in Agent-Oriented Software Engineering[J]. Autono-

- mous Agents and Multi-Agent Systems, 2004, 9(3):253-283.
- [9] Hilaire V, Koukam A, Rodriguez S. An Adaptive Agent Architecture for Holonic Multi-Agent Systems[J]. ACM Trans on Autonomous and Adaptive Systems, 2008, 3(1):1-24.
- [10] Mano J P, Bourjot C, Lopardo G, et al. Bio-inspired Mechanisms for Artificial Self-Organized Systems [J]. Informatica 2006, 30(1):55-62.
- [11] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems[M]. Oxford University Press, 1999.
- [12] Camazine S, Deneubourg J, Frank R N, et al. Self-Organization in Biological Systems[M]. Princeton University Press, 2001.
- [13] Jelasity M, Krasnogor N, Gustafson S, et al. Engineering Emergence Through Gossip[C]//Proc of the Joint Symposium on Socially-Inspired Computing, 2005:123-126.
- [14] Jelasity M, Babaoglu O. T-man:Gossip-Based Overlay Topology Management[C]//Proc of the 3rd Engineering Self-Organising Applications, 2005:1-15.
- [15] Kamvar S D, Schlosser M T. The Eigentrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks[C]//Proc of the 12th Int'l World Wide Web Conference, 2003:640-651.
- [16] Hassas S, Giovanna D M, Karageorgos A, et al. On self-Organising Mechanisms from Social, Business and Economic Domains[J]. Informatica, 2006, 30(5):63-71.
- [17] Mamei M, Ronaldo M, Zambonelli F. Case Studies for Self-Organization in Computer Science[J]. Journal of Systems Architecture, 2006, 52(8):443-460.
- [18] Giovanna D M S. Self-Organisation and Emergence in MAS: An Overview[J]. Informatic, 2006, 30(1):45-54.
- [19] Bernon C, Chevrieer V, Hilaire V, et al. Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison[J]. Informatica, 2006, 30(1):73-82.
- [20] Picard G, Gleizes M P. Cooperative Self-Organization to Design Robust and Adaptive Collectives[C]//Proc of the 2nd Int'l Conf on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2005:236-241.
- [21] Mamei M, Zambonelli F. Self-Organization in Multi-Agent Systems: A Middleware Approach[C]//Proc of the Int'l Workshop on Engineering Self-Organising Applications, 2004:233-248.
- [22] Hales D, Edmonds B. Evolving Social Rationality for MAS Using "Tags" [C]//Proc of the Second Int'l Joint Conf on Autonomous Agents and MultiAgent Systems, 2003:495-503.
- [23] 毛新军. 面向主体的软件开发[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [24] Sandelaria C, Pavon J. An Adaptive Agent Model for Self-Organization MAS[C]//Proc of the Int'l Conf on Autonomous Agents, 2008:1639-1642.
- [25] Maira A, Carlos J P, Paulo S, et al. Self-Organization and Emergent Behavior in Multi-Agents Systems: A Bio-inspired Method and Representation Model[C]//Proc of the Science of Computing Programming, 2008:48-88.
- [26] Morandini M, Penserini M, Perini L. Modelling Self-Adaptivity: A Goal-Oriented Approach[C]//Proc of the Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2008:469-470.
- [27] Tom D W, Tom H. Towards a Methodology for Engineering Self-Organizing Emergent Systems[C]//Proc of the Int'l Conf on Self-Organization and Adaptation of Multi-Agent and Grid Systems, 2005:18-34.
- [28] Bernon C, Gleizes M P, Peyruqueou S, et al. ADELFE: A Methodology for Adaptive Multi-Agent Systems Engineering[C]//Proc of the 3rd Int'l Workshop on Engineering Societies in the Agents World, 2002:156-169.
- [29] Puviani M, Serugendo G D M, Frei R, et al. Methodologies for Self-Organising Systems: A SPEM Approach[C]//Proc of IEEE/WIC/ACM Int'l Conf on Intelligent Agent Technology, 2009:66-69.
- [30] Tom D W, Tom H. Design Patterns for Decentralized Coordination in Self-Organizing Emergent Systems[M]. Engineering Self-Organizing Systems. Springer-Verlag, 2007:28-49.
- [31] Gardelli L, Mirko V, Andrea O. Design Patterns for Self-Organizing Multivalent Systems [C]// Proc of the Int'l Workshop on Engineering Emergence in Decentralised Automatic Systems, 2007:61-70.
- [32] Wang M, Qiu L, Lin F, et al. A Multi-agent System Development Tool Support for Self-Organization[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2006, 6(9):1-5.
- [33] AgentBuilder[CP/OL]. [2009-12-25]. <http://www.agent-builder.com>.
- [34] Gorodetski V, Oleg K, Samoilo V, et al. Multi-Agent System Development Kit Software Tool Implementing Gaia Methodology[C]//Proc of the Intelligent Information Processing, 2004:69-78.
- [35] Wilensky U. Modeling Nature's Emergent Patterns with Multi-Agent Languages[C]//Proc of EuroLogo, 2001:1-12.
- [36] Marrow P, Koubarakis M. Self-Organising Applications Using Lightweight Agents[C]//Proc of the Int'l Workshop on Engineering Self-Organising Applications, 2006:120-129.
- [37] Wang Maoguang, Shi Zhongzhi, Li Zeng, et al. Agent Grid Based Enterprise Application Integration[C]//Proc of the 3rd Int'l Conf on Natural Computation, 2007:673-677.
- [38] Babaoglu O, Meling H, Montresor A. Anthill: A Framework for the Development of Agent-Based Peer-to-Peer Systems[R/OL]. [2010-04-11]. Technical Report. URL: <http://www.cs.unibo.it/> 2001.
- [39] Nicola B, Mamei M, Zambonelli F. Mechanisms of Self-Organization in Pervasive Computing[C]//Proc of Workshop

from Object to Agent, 2006:26-36.

- [40] 胡建理,吴泉源,周斌. P2P 环境下基于信誉的信任模型研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(9):1-6.
- [41] Weikum G, Monkeberg A, Hasse C. Self-Tuning Database Technology and Information Services: From Wishful Thinking to Viable Engineering[C]//Proc of the 28th Very Large Databases Conference, 2002:20-31.



郭毅(1981 -),男,陕西西安人,博士生,研究方向为自组织系统与软件工程。

E-mail: atsm@tom.com

GUO Yi, born in 1981, PhD candidate, his research interest includes self-organization systems, and software engineering.

tion systems, and software engineering.



毛新军(1970 -),男,浙江江门人,博士,教授,博士生导师,研究方向为面向 Agent 软件工程。**E-mail:** Mao.xinjun@gmail.com

MAO Xin-jun, born in 1970, PhD, professor, PhD supervisor, his research interest includes agent oriented software engineering.



董孟高(1979 -),男,陕西西安人,博士生,研究方向为自适应系统软件工程。

E-mail: janson_mgd@163.com

DONG Meng-gao, born in 1979, PhD candidate, his research interest includes software engineering for adaptive systems.