

互联网环境中基于环境激发效应的协同式概念建模

蒋 逸¹ 张 伟^{2,3} 赵海燕^{2,3} 金 芝^{2,3}

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)¹

(高可信软件技术教育部重点实验室 北京 100871)² (北京大学信息科学与技术学院 北京 100871)³

摘 要 随着领域的规模性和复杂性不断增加,建立领域的概念模型往往超出了个人的能力。通过对群体智慧的聚集与组织,采用协同方法构建模型具有重要意义。基于社会性昆虫的群体协同机制——环境激发效应,提出了一种互联网环境下面向大规模群体的协同式概念建模方法。该方法具有两个特点:a)提供一种以环境为媒介的间接交互方式,解决了群体协同的规模可扩展性问题;b)提供一种协同的激励机制,初步解决了松散异步的沟通方式下群体协同一致的问题。这使得协同建模者能够相互借鉴知识经验来完善概念模型。在此基础上,通过实例研究对该方法的可行性和有效性进行了验证。

关键词 概念建模,协同建模,环境激发效应

中图分类号 TP311.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.11.047

Stigmergy-based Collaborative Conceptual Modeling in Web Environment

JIANG Yi¹ ZHANG Wei^{2,3} ZHAO Hai-yan^{2,3} JIN Zhi^{2,3}

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)¹

(Key Laboratory of High Confidence Software Technologies (Peking University), Ministry of Education, Beijing 100871, China)²

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)³

Abstract With the increasing of the domain's scale and complexity, constructing the conceptual model of the domain is usually beyond individual's ability. The problem can be solved through gathering and organizing the collective intelligence. In this way, the collaborative conceptual modeling approach was of great significance. Based on a social-insects collaboration mechanism, called stigmergy, an approach was proposed to help the large-scale modelers to conduct collaborative conceptual modeling in the Web environment. The main characteristic of this approach is twofold. First, this approach provides an environment-based indirect interaction method to solve scalability problem in the communication. Second, this approach provides a stimulation-based collaboration mechanism to initially solve the collaboration problem in such open and distributed environment. Based on this, the collaborator can learn from each experience and knowledge to improve the conceptual model. We conducted a case to evaluate the feasibility of this approach.

Keywords Concept modeling, Collaborative modeling, Stigmergy

1 引言

软件开发中的一项重要任务是实现对问题域中的基本概念及其之间关系(即概念模型)的有效理解和表达^[1-3]。对问题域的表达独立于软件的设计与实现,为后续的开发人员提供一个对问题域清晰一致的理解。由于问题域的复杂性及建模者自身经验能力的有限性,极少数专家才具备对问题域完整的理解和高质量的表达能力。建模者需要通过结合各自的知识经验,协同构建概念模型。

随着基于互联网的软件开发模式的兴起,如何使得一个

大规模且地理分布的利益相关者群体能够通过松散、异步的方式实现对问题域概念模型的协同式建模,逐渐成为软件开发中一个重要的问题。互联网中,关注于同一领域的利益相关者,可以通过协同建模的方法提升对问题域的理解和表达能力,构成了潜在的协同建模关系。他们可能分属不同的项目,关系松散,需要通过有效的方式来支持这些相关者的协同建模。其中有两个主要问题:首先,协同中需要必要的沟通。互联网中不同建模者时间空间上的分布性,要求沟通的异步性;互联网中协同建模人员规模可能巨大,需要支持群体协同的规模可扩展性。其次,协同中需要保证有效的参与。互联

到稿日期:2014-11-12 返修日期:2015-01-27 本文受国家自然科学基金创新研究群体科学基金(61121063),国家自然科学基金(61272162, 91318301)资助。

蒋 逸(1989—),男,硕士生,主要研究方向为模型驱动软件工程、协同式软件工程, E-mail: jiangyi@nuaa.edu.cn; 张 伟(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为面向特征的软件复用、需求工程、基于大规模协同的软件工程; 赵海燕(1966—),女,博士,副教授,主要研究方向为需求工程、模型驱动软件工程、编程语言和系统; 金 芝(1962—),女,博士,教授,主要研究方向为需求工程、知识工程。

强度,使得后续的蚂蚁更容易地确认食物的位置。

在人类活动中,随着 Web 2.0 时代的到来,互联网中很多开源项目通过互联网中的大规模群体协同得以创建、演化,比如非常知名的维基百科,其涵盖内容甚至超出了传统的字典、百科,对于新词条能够进行快速的更新。而相较于传统的新华字典、大英百科,维基百科中词条的维护者通常为非专业人员,对词条可能也仅仅只有部分的认识。但是通过基于环境激发效应的协作方式,这些了解部分词条信息的人员最终对词条建立了可信的信息。

3 基于环境激发效应的协同式概念建模

环境激发效应提供了一种重要群体协同机制。其中两个重要因素构成了环境激发效应的实现:构建群体概念建模的协同环境、构建群体概念建模的协同机制。

3.1 协同建模环境的构建

协同式建模环境^[6,7]是建模者之间间接交互的平台基础,支持大规模群体对同一个问题域的概念建模。以环境为媒介的间接交互适应于解决沟通规模的可扩展性问题。

协同建模环境如图 2 所示,个体概念模型与群体概念模型是协同式建模环境中的两个重要成分。



图 2 协同式建模环境

个体概念模型用于记录单个建模者的模型信息,群体概念模型记录群体建模信息。个体建模者创建自己的个体概念模型,这些个体概念模型信息会被增量式地记录到环境中。

环境通过群体概念模型进行存储,群体概念模型由个体概念模型融合而成。群体模型包含了对问题域中概念及其关系这些元素,也包含了个体模型元素与这些群体模型中元素的对应关系。群体模型实际反映了群体对于领域的理解和表述。建模者可以通过查看群体概念模型信息,来获得对当前问题域的认识。

个体概念模型可以通过基本的类图形式进行描述(见图 1)。对于同一个概念,不同个体概念模型中可能存在不同的命名,通过不同的属性进行描述。如对于同一个类可能使用不同的名称。

由于对概念描述的多样性,需要对传统的类图进行扩充以形成群体概念模型,如图 3 所示。个体(individual)与群体概念模型元素(Element)为引用关系。在建模时,个体引用(reference)群体概念模型元素。不同个体对同一群体元素的引用通过引用次数(nor)进行记录。群体概念模型中元素分为两种:环境元素(EnviElement)和用户元素(UserElement)。用户元素(如类名、属性名)是个体模型中对概念和关系的描述。环境元素抽象地表示了这些概念和概念间关系(通过类、属性、关系)。由于在群体环境中,同一概念和关系可能有多种描述方式,一个环境元素可能包含(own)多个用户元素的描述。

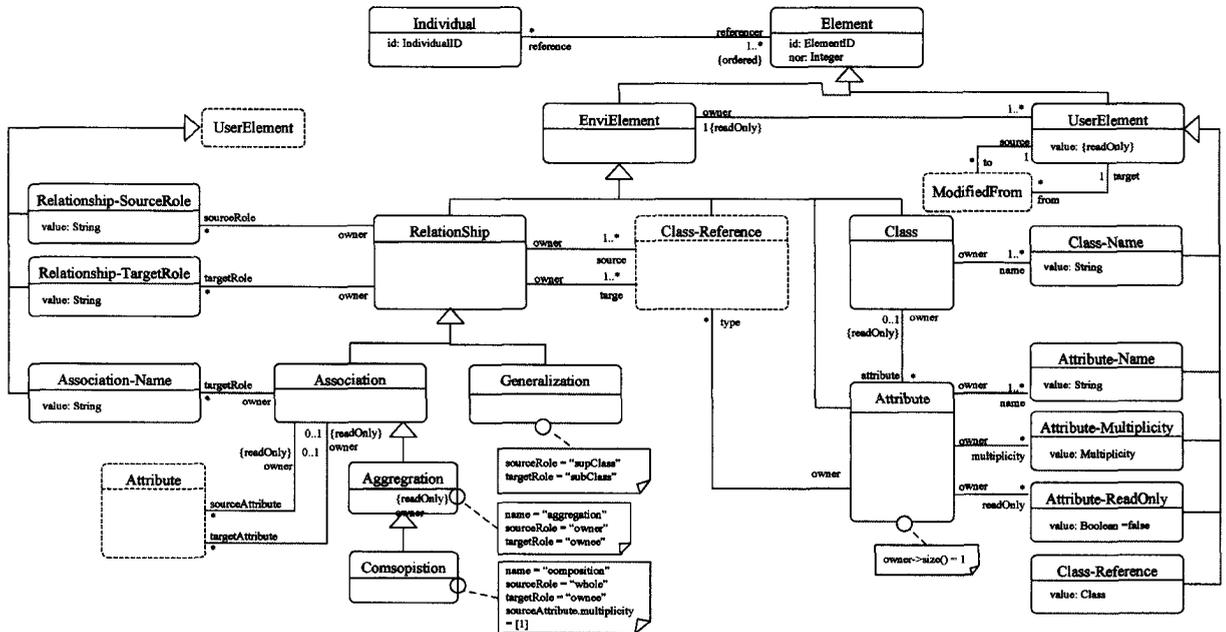


图 3 群体概念模型

使用传统的类图的图形化样式难以表示环境元素。本文对群体概念模型使用更为一般的图的形式来简洁地示意概念模型。环境元素通过其 ID 进行表示,系统元素通过其值(value)进行表示。两个不同建模者的个体模型的部分信息在群体模型中的表示示例如图 4 所示。

协同建模环境记录了不同个体概念模型的元素信息及引

用关系。协同建模环境使得个体建模信息独立于实际的建模者,环境信息可以被地理上分布的协同建模者异步地进行访问更新。在问题域概念有限的假设下,人员规模影响引用次数,但并不导致环境规模显著增大。以协同式建模环境(群体模型)作为媒介,支持者、建模者进行协同式建模。

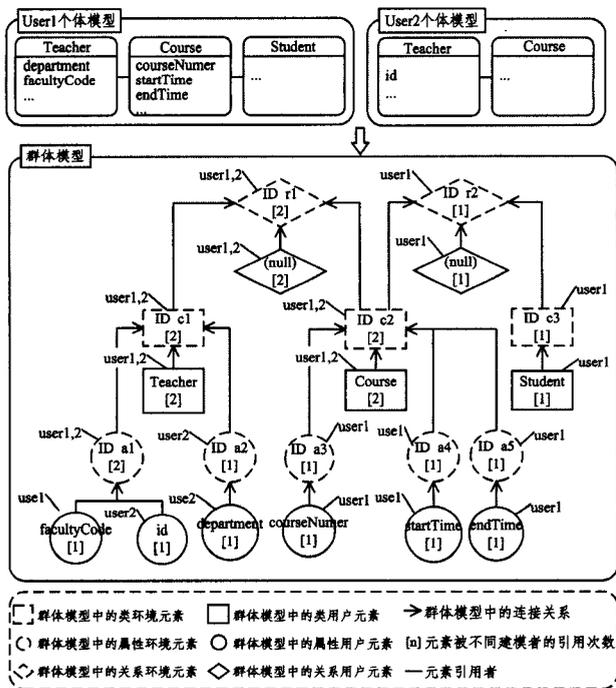


图4 个体模型与群体模型

3.2 协同建模机制的构建

协同建模机制^[7,8]保证了互联网环境中关系松散的建模者能够有效地开展协同建模工作。

在一般的建模过程中,存在两个必不可少的过程:借鉴参考他人模型和建立自身模型。在基于环境激发效应的协同建模过程中,通过环境作为媒介,这两个过程变为了增量式地获得群体模型信息的反馈和引用群体模型的信息。引用过程有限地修改了群体概念模型结构,改变了引用关系,形成了群体对问题域的理解和表述。反馈过程获取了群体对问题域的认识,补全个体模型,提升个体表述。通过引用与反馈的过程形成激励,保证了协同的有效性,使得个体模型、群体模型的质量得到提高,如图5所示。

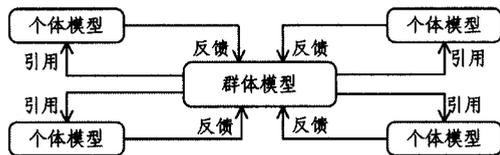


图5 引用与反馈

3.2.1 引用

在群体概念建模中,个体增量式地建立个体模型信息被识别为引用群体模型元素。个体对群体的引用改变了群体模型的结构信息和引用信息。根据元素在群体模型中是否存在,引用可以分为两种。

创建引用:新的元素在群体模型中被建立。用户引用该元素,并初始化引用次数为1。

直接引用:群体模型中已存在的元素可以被用户引用,引用时,元素引用次数增加。

图6给出了某个建模者引用类“Teacher”的一个单独操作。通过引用操作,在群体概念模型中,教师概念(ID c1)引用次数提高,教师概念的命名“Teacher”引用次数提高。

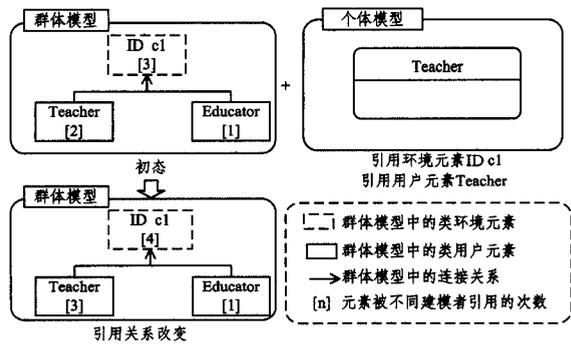


图6 引用

3.2.2 反馈

在群体概念建模中,根据个体模型与群体模型已经形成的引用关系,推荐相关联元素来补充完善个体模型。根据群体模型中元素的引用次数,形成推荐程度的强弱。群体模型对个体的反馈一定程度上改变了建模者对概念的理解与表述。

图7给出了某个建模者在建立教师类的属性信息时获得的反馈信息。通过群体模型得到群体中对教师类建立的职工号和从属部门两个属性信息。建模者在建立属性信息时,修正了职工号的表达方式(由 teacherCode 改为 facultyCode),并及时补充了部门信息。

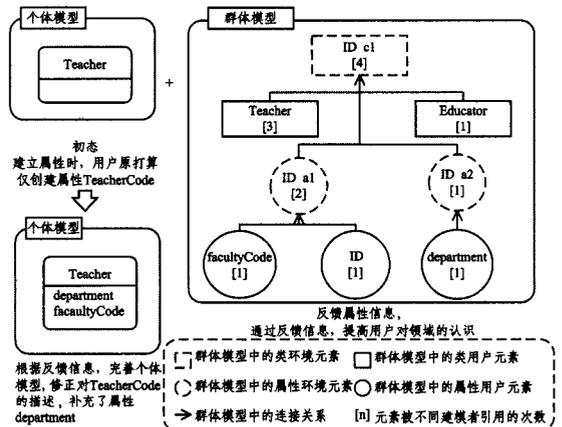


图7 反馈

3.2.3 激励

引用与反馈的过程形成了建模者之间的间接交流关系和用户在协同建模过程中的激励行为,能帮助建模者更好地认识和改善群体模型。激励保证了引用和反馈过程的正确性。在协同建模过程中,这种激励的作用可以从个体和群体两个角度来进行说明。

个体激励:在引用的过程中,建模者查看群体模型,创建或直接引用群体模型信息。当用户采取恰当的引用时,因为相同的概念应该具有基本相同的关联信息,用户将会得到群体模型中有效的反馈信息,帮助用户提升对领域的认识,并建立相关信息;当用户引用无关的元素时,反馈信息同样无关;如果引用新元素,因为新元素并不在其相关元素中,他就需要独自地完成相关元素的创建,相较于引用相关信息加大了创建难度。由于反馈的存在,建模者更倾向于将元素与环境中的相似的、完善的元素进行引用。通过反馈是否符合用户的预期,用户可以验证其模型的合理性、引用的合理性,从而修正

个体模型和引用方式,这就促使用户进行合理的引用从而形成共识。

群体激励:由于个体激励机制的影响,个体更倾向于引用环境中更接近、更完善的元素来获取更合适的反馈信息,从而使得优质元素的引用次数增加了。同时,更高的引用次数也使得元素更容易被反馈给用户。在融合和反馈的过程中,模型中优质的元素将更容易地被融合和反馈,从而在群体模型中凸显出来。

3.3 实例

图 8 给出了一个基于环境激发效应的协同建模的样例。通过引用和反馈,个体模型与群体模型相互激励,进一步完善。图 8 分为 6 个部分:

- a) 个体模型. 状态 0: 考虑建立教师类, 名称使用 Teacher 或 Tutor 不确定。
- b) 群体模型. 状态 0: 反馈类信息, 存在 Teacher 和 Educator 两个类, 在群体中分别引用 2 次和 1 次。
- c) 个体模型. 状态 1: 参考反馈信息建立类 Teacher; 考虑类 Teacher 中应该包含属性 id、department、title。
- d) 群体模型. 状态 1: 修改引用次数并反馈属性信息。
- e) 个体模型. 状态 2: 修改了属性 id 的表述为 facultyCode, 建立属性 department, 认为属性 title 必要, 坚持建立属性 title。
- f) 群体模型. 状态 2: 修改引用并新增属性 title。

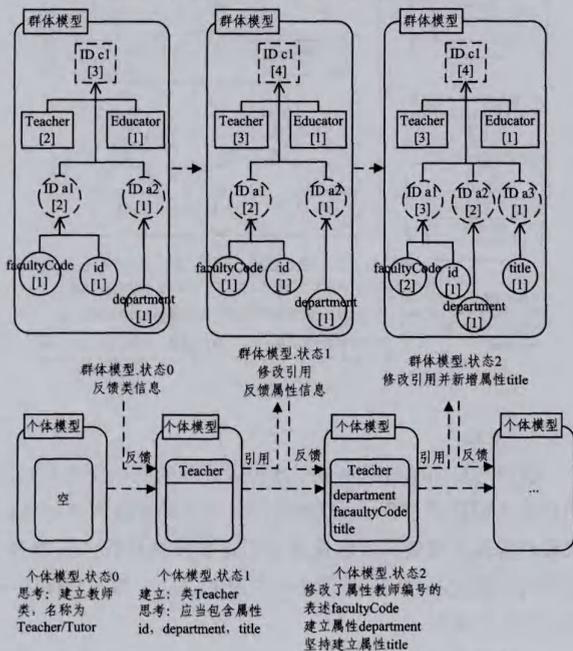


图 8 基于环境激发效应的协同式建模举例

通过这种基于环境激发效应的协同建模方式,群体模型指导个体建模,改善个体模型。个体模型补充完善群体模型信息,并改变了群体模型元素的引用关系。通过建模者对模型元素的引用关系,一定程度上量化了模型元素的群体认同度,为后续建模行为提供了指导。

4 实例研究

基于环境激发效应的协同式建模方式,本文实施了一个

协同式建模实验。6 个参与者(包括计算机专业的 1 个博士、4 个硕士和 1 个本科生)共同构建一个课程管理系统的概念模型。同时通过建立协同式工具来支持这个实验。

在开放的项目中,不同建模者可能在时间、空间上是分布的,建模者间关系松散,他们通过学习模型信息而非直接地进行交流。为了模仿实际环境,实验中建模者禁止进行线下讨论,各自建立问题域的模型。基于本文提供的工具,通过环境中群体模型信息进行间接交流,从而完成协同式的建模工作。同时建模者并不需要同步地参与建模,但要求建模者在一周内完成建模工作,且他们可以在各自的时间点进行模型的建立。

个体概念建模与群体模型间建立起引用关系,通过群体概念模型的结构信息和引用信息进行反映。

4.1 群体概念模型结构信息

首先对项目中的群体概念模型进行概览。表 1 给出了群体模型中引用次数的统计情况。如{引用次数:4,元素个数:68}表示群体模型中有 68 个元素的引用次数为 4(创建同样被认为是一次引用)。

表 1 群体模型中元素的引用次数

引用次数	1	2	3	4	5	6
元素个数	438	70	79	68	62	3

完整的群体概念模型比较复杂,很难在一张图中清晰地表示。图 9 给出了概念模型中类信息的结构关系。类通过类名和类的 ID 进行区分,类间关系通过边来表示。图中元素被引用越多,元素颜色越深。可以直观地看到,由于融入不同用户的信息,群体模型变得很复杂。通过引用次数信息,群体中获得大部分建模者认同的元素能够清晰地涌现出来。

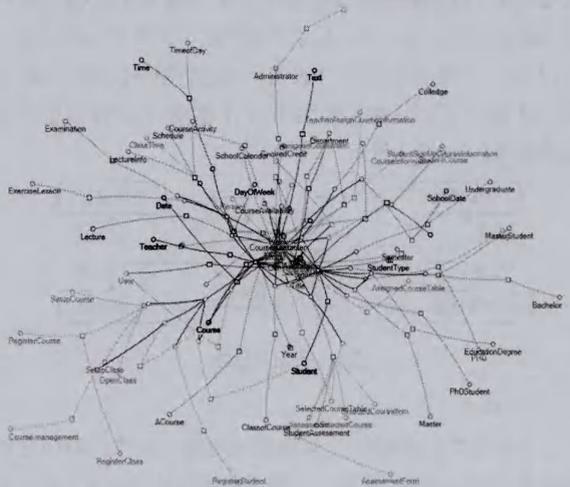


图 9 群体概念模型中的类信息

4.2 群体概念模型引用关系

元素的引用次数体现了群体中的建模者对元素的认同程度。引用次数与元素的质量正相关,高质量元素通常也有着高引用次数。

元素的质量表现有两层含义:a)元素所描述的概念对于领域的必要性;b)元素描述对于概念的准确性。图 10 给出了群体模型中的一部分详细信息。表 2 列出了元素质量与引用次数之间的关系。

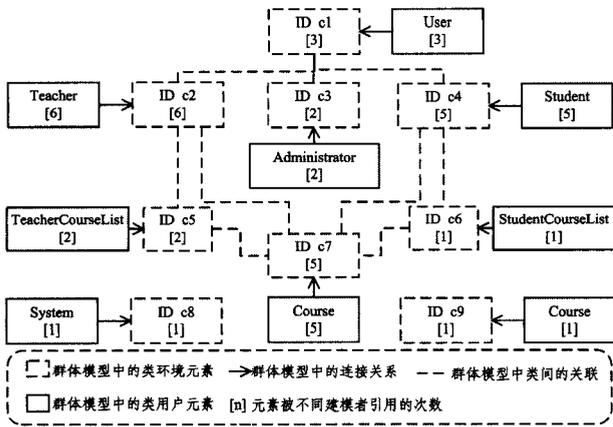


图 10 群体概念模型中的类信息(部分)

表 2 引用次数与元素质量

引用次数	所占比例	成因	举例
6,5	高	必要元素,描述准确	Course, Teacher
4,3,2	部分	非必要元素	User, TeacherCourseList
2,1	低	无关元素或者与已存在的元素相冲突	Course', System

通过图 10 和表 2 的信息可以发现,通过协同式概念建模,元素的引用与元素的质量存在如下关系:

a) 被绝大部分用户引用的元素通常有着较高的质量。如“Course”、“Student”和“Teacher”是课程管理系统中必不可少的概念,同时它们对概念的描述也很准确。同时发现,高引用次数的元素间存在比较好的连通性,通过引用高引用次数的节点,为其推荐相关的节点。这也使得融合和推荐的工作形成了一种正向的激励。

b) 对于被部分用户引用的元素,通常它们在项目中并不必需。如 User 这个类是 Student 和 Teacher 的一个父类,在概念模型中,它并不像 Student 和 Teacher 两者那么必需,所以部分建模者并没有建立。“TeacherCourseList”这样的类在概念模型中可能是不需要的。

c) 仅被少量用户引用的类通常表现出与群体的观点相违背。比如“Course”这个类在一个概念模型中肯定只需要一次,而在群体模型中出现了两次。所以一个对 Course 描述的更为清晰、准确的类获得了更高的引用次数,另一个类就不再被后续引用。而像“System”这个类,其在当前模型中并不需要,所以极少有人会引用。同时也可以从图中看到,低引用次数的元素通常相对孤立,这也防止了用户引用这些低质元素。

由于引用次数与元素的质量正向相关,因此通过引用次数进行反馈的方式,建模者可以有效地挑选出高质量的模型。

实验结果证明:基于环境激发效应的群体协同式建模方法支持网络环境下时间、空间上分布的建模者间的交流,使得建模者能够正确地协同合作完善模型,弱化个人因素对概念模型的影响。虽然由于条件的限制,并没有达到大规模的建模人数,但多次实验的结果均证明了方法的有效性。

5 相关工作

由于问题的复杂性,极少有专家能够对问题域进行高质量的完整的建模。需要通过群体协同的方式完成概念模型的建立。Peter Rittgen^[9]对协作建模过程中的认同规则、协商方式和主要协同活动进行设计,并通过 COMA 工具验证了协同的有效性。Peter Rittgen 提到采用计算机辅助的方式(如 VoIP 网络电话),其工作同样适用于分布式的群体中。该方

式本质上是针对一个紧密结合的小规模群体的协同问题,其主要是基于反复的协商讨论。本文的适用情况与之有很大的不同。互联网环境中的协同建模者关系松散,难以形成对模型的协商讨论。他们希望获领域知识,但并不实际关心他人的模型情况,所以需要在查看领域知识和建立模型的过程中形成有效的协同过程。协商由于需要双方在同一个时间点进行沟通,并不适合容易造成交流的困难^[10]、环境人员时间及空间上的分布等特性互联网环境。同时由于人员规模扩大,协商的成本也会显著扩大。所以本文采用环境激发效应,通过建模环境进行间接交流,保证了交互的异步性。通过环境中用户必要的建模行为形成协同关系。

环境激发效应最早从昆虫群体的社会现象中观察到,并被用于处理分布的群体进行异步的甚至自组织的协同问题。后来衍生出很多研究和应用。如 Decker^[11]等人提出一种基于 wiki 的平台,用以异步协同地处理需求工程。通过一个发起人建立一个需求主题,并规定该主题的组织结构,对此主题感兴趣的利益相关者即可按照规定的结构对该需求主题的内容进行编辑。其本质上是对同一份需求内容,结合不同利益相关的参与共同维护。而不同的利益相关者对同一问题可能存在不一致的观点,从而导致争论。该方法可以检测出这种争论的具体处理方式^[11]。在本文中,不同建模者的建模行为影响环境。但不同的是环境仅仅作为群体协作的一个媒介,支持群体在环境中有效建立协同关系。对于同一个概念,不同个体模型表述存在多样性,甚至可以存在矛盾的信息。通过连接关系形成该群体对领域中这一概念的理解和表述,以备后续用户参考引用。通过群体概念模型中的引用值,一定程度上量化了群体对该模型元素的认同度,为后续建模行为提供了指导。

在模型的处理上,一些相关的研究给出了对多个模型融合的方法^[12-15]。G Brunet^[13]等人在分布式的建模环境下对模型的融合工作做了总结,形式化地阐述了模型的融合(merge)问题,并更细致地阐述了匹配(match)、差异(diff)、分割(split)和切片(slice)等操作。本文中,建模者的引用行为形成了个体模型与群体模型的对应关系,与匹配的概念近似。本文主要是针对建模者如何在建模过程中有效地形成协同工作方式进行研究。通过环境进行引用和反馈形成激励,保证协同建模的有效进行。与基于算法的方式不同,建模者的自身认识和相关信息的反馈是保证引用正确进行的前提。两者研究的出发点有所不同,但可以通过结合有效的匹配算法,提高引用效率,提升引用的准确性。

结束语 本文基于环境激发效应,针对互联网这种分布、开放、动态环境中的大规模群体协同概念建模群体,提供必要的协同环境与协同方法。其基本思想为:通过环境间接交互方式,解决大规模建模者协同建模时存在的交流困难。通过环境激励机制,使得建模者能够正确地协同合作完善模型。在此基础上,本文给出了主要由个体概念模型与群体概念模型构成的协同式建模环境,给出了建模过程中以引用和反馈为基础的环境激励的产生方式。实例研究验证了该方法的可行性和有效性。

后续将从 3 个方面进一步对实验和方法进行完善:a)通过更多的建模者参与协同建模,进一步验证本方法对于人员规模的可扩展性;b)通过对建模者角色的分析(如客户、领域专家、程序等角色),考虑不同角色的建模者对于协同建模的

影响;c)通过加入有效的模型匹配算法更为高效准确地建立模型的引用过程。

参 考 文 献

- [1] Wand Y, Weber R. Research commentary: information systems and conceptual modeling—a research agenda [J]. *Information Systems Research*, 2002, 13(4): 363-376
 - [2] Hoppenbrouwers S, Proper H A, van der Weide T P. A fundamental view on the process of conceptual modeling [M]// *Conceptual Modeling ER 2005*. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 128-143
 - [3] Mahaux M, Nguyen L, Gotel O, et al. Collaborative creativity in requirements engineering: Analysis and practical advice [C]// *2013 IEEE Seventh International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)*. IEEE, 2013: 1-10
 - [4] Theraulaz G, Bonabeau E. A brief history of stigmergy [J]. *Artificial Life*, 1999, 5(2): 97-116
 - [5] Dipple A, Raymond K, Docherty M. General theory of stigmergy: Modelling stigma semantics [J]. *Cognitive Systems Research*, 2014, 31: 61-92
 - [6] Zhang Wei, Yi Li, Zhao Hai-yan, et al. Feature-oriented stigmergy-based collaborative requirements modeling: an exploratory approach for requirements elicitation and evolution based on web-enabled collective intelligence [J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(8): 1-18
 - [7] Kovitz B, Swan J. Structural stigmergy: a speculative pattern language for metaheuristics [C]// *Proceedings of the 2014 Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation* Companion. ACM, 2014: 1407-1410
 - [8] Ramos V, Merelo J J. Self-organized stigmergic document maps: Environment as a mechanism for context learning [J/OL]. <http://arxiv.org/ftp/cs/papers/0412/0412075/pdf>
 - [9] Rittgen P. Collaborative modeling—a design science approach [C]// *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. Hawaii, 2009
 - [10] Šmite D, Moe N B, Torkar R. Pitfalls in remote team coordination: Lessons learned from a case study [M]// *Product-Focused Software Process Improvement*. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 345-359
 - [11] Decker B, Ras E, Rech J, et al. Wiki-based stakeholder participation in requirements engineering [J]. *IEEE Software*, 2007, 24(2): 28-35
 - [12] Xing Z, Stroulia E. UMLDiff: An Algorithm for Object-Oriented Design Differencing [C]// *Proceedings of 20th IEEE International Conference on Automated Software Engineering (ASE'05)*. 2005: 54-65
 - [13] Brunet G, Chechik M, Easterbrook S, et al. A manifesto for model merging [OL]. <http://folk.uio.no/shiva/research/assets/gammabo.pdf>
 - [14] Mehra A, Grundy J, Hosking J. A generic approach to supporting diagram differencing and merging for collaborative design [C]// *Proceedings of the 20th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*. ACM, 2005: 1-10
 - [15] Sabetzadeh M, Easterbrook S. View merging in the presence of incompleteness and inconsistency [J]. *Requirements Engineering*, 2006, 11(3): 174-193
-
- (上接第 207 页)
- [5] Uludag U, Pankanti S, Prabhakar S, et al. Biometric cryptosystems: issues and challenges [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(6): 948-960
 - [6] Vaidel A, Majumdar A K, Sural S. Performance comparison of distance metrics in content-based image retrieval applications [C]// *International Conference on Information Technology*. Bhubaneswar, India; CIT, 2003: 159-164
 - [7] Killourhy K S, Maxion R A. Comparing anomaly-detection algorithms for keystroke dynamics [C]// *Dependable Systems & Networks*. Lisbon; IEEE IFIP, 2009: 125-134
 - [8] Zhong Y, Deng Y, Jain A K. Keystroke dynamics for user authentication [C]// *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. Providence, RI; IEEE Computer Society, 2012: 117-123
 - [9] Monroe F, Reiter M K, Wetzel S. Password hardening based on keystroke dynamics [J]. *International Journal of Information Security*, 2002, 1(2): 69-83
 - [10] Umphress D, Williams G. Identity verification through keyboard characteristics [J]. *International Journal of Man-machine Studies*. 1985, 23(3): 263-273
 - [11] Messerman A, Mustafic T, Camtepe S A, et al. Continuous and non-intrusive identity verification in real-time environments based on free-text keystroke dynamics [C]// *2011 International Joint Conference Biometrics (IJCB)*. Washington, DC; IEEE Biometrics Council, 2011: 1-8
 - [12] Al Solami E, Boyd C, Clark A, et al. Continuous Biometric Authentication: Can It Be More Practical? [C]// *2010 12th IEEE International Conference High Performance Computing and Communications (HPCC)*. Melbourne, VIC, 2010: 647-652
 - [13] Zack R S, Tappert C C, Cha S H. Performance of a long-text-input keystroke biometric authentication system using an improved k-nearest-neighbor classification method [C]// *2010 Fourth IEEE International Conference, Biometrics: Theory Applications and Systems (BTAS)*. Washington, DC; IEEE Biometrics Council, 2010: 1-6
 - [14] Sim T, Janakiraman R. Are digraphs good for free-text keystroke dynamics? [C]// *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007 (CVPR)*. Minneapolis, MN, 2007: 1-6
 - [15] De Ru W G, Eloff J H P. Enhanced password authentication through fuzzy logic [J]. *IEEE Expert*, 1997, 12(6): 38-45
 - [16] Tey C M, Gupta P, Gao D. I can be You: Questioning the use of Keystroke Dynamics as Biometrics [C]// *The 20th Annual Network & Distributed System Security Symposium (NDSS)*. San Diego, CA, 2013: 134-150
 - [17] Cho S, Han C, Han D H, et al. Web-based keystroke dynamics identity verification using neural network [J]. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 2000, 10(4): 295-307
 - [18] Joyce R, Gupta G. Identity authentication based on keystroke latencies [J]. *Communications of the ACM*, 1990, 33(2): 168-176
 - [19] Kang P, Hwang S, Cho S. Continual retraining of keystroke dynamics based authenticator [M]// *Advances in Biometrics*. Seoul, Korea; Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1203-1211
 - [20] Yu E, Cho S. GA-SVM wrapper approach for feature subset selection in keystroke dynamics identity verification [C]// *Proceedings of the International Joint Conference Neural Networks*, 2003. Portland, OR, 2003: 2253-2257