

计算思维的研究及其进展

牟琴¹ 谭良^{1,2}

(四川师范大学计算机学院 四川省可视化计算和虚拟现实重点实验室 成都 610068)¹

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)²

摘要 计算思维是当前国际计算机界广为关注的一个重要概念,也是当前计算机教育需要重点研究的重要课题。国内外计算机界、社会学界以及哲学界的广大学者对这一课题进行了广泛的研究与探讨,取得了一些积极的成果,但仍有分歧。首先以时间为线索,根据计算思维的形成特点,提出了萌芽时期、奠基时期和混沌时期的阶段划分方法,对计算思维的形成和发展过程进行了全面的分析,给出了计算思维演化进程的一个全景视图;然后重点综述了计算思维的关键内容,包括计算思维的概念、计算思维的原理以及计算思维在教学中的应用等,并进行了总结。最后,结合已有的研究成果,展望了计算思维未来的研究方向及其面临的挑战。

关键词 计算思维,计算学科,科学计算

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A

Research and Progress in Computational Thinking

MOU Qin¹ TAN Liang^{1,2}

(Key Lab of Visualization in Scientific Computing and Virtual Reality of Sichuan, College of computer,
Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)¹

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)²

Abstract Computational thinking is an widely-concerned and important concept in current international computer community, and it is an important issue which needs to be researched by current computer educational. It has been wildly researched and discussed by many domestic and overseas scholars in computer community, academic and philosophical circles on this subject, although there are some positive results, but the differences are still widely remained. Firstly, according to the clues in time and the characters of the formation of computational thinking, a method of phases was proposed by the article basic on its infancy, foundation and chaos period, it widely analysed the calculation of the formation and development process of the computational thinking and gave a panoramic view of the evolution process of computational thinking. Then, it illuminated the key content of the computational thinking, including the conception, the principle, the application of the computational thinking in education, and it summarized the computational thinking. Based on the existing research results, we made a vista of the future research direction of the computational thinking and its challenges.

Keywords Computational thinking, Computing disciplines, Scientific computing

1 引言

2006年3月,美国卡内基·梅隆大学计算机系主任周以真(Jeannette M. Wing)教授在美国计算机权威杂志ACM《Communication of the ACM》上发表并定义了计算思维(Computational Thinking)。她指出,计算思维是每个人的基本技能,不仅仅属于计算机科学家。我们应当使每个孩子在学习培养解析能力时不仅掌握阅读、写作和算术(Reading, wRiting, and aRithmetic——3R),还要学会计算思维,犹如印刷出版促进3R的普及,计算和计算机也以类似的正反馈促进了计算思维的传播。她认为,这种思维在不久的将来,会成为每

一个人的技能组合,而不仅仅限于科学家,普适计算之于今天就如计算思维之于明天,而普适计算是已成为之日现实的昨日之梦,而计算思维就是明日之现实^[1,2]。随即这一概念被国内外计算机界、社会学界以及哲学界的广大学者进行了广泛的研究与探讨。

目前,计算思维是当前国际计算机界广为关注的一个重要概念,也是当前计算机教育需要重点研究的重要课题。在国外,计算思维得到美国教育界的广泛支持,不仅有卡内基·梅隆大学的专题讨论,更有包括美国计算机协会(ACM)、美国国家计算机科学技术教师协会(CSTA)、美国数学研究所(AIM)等组织在内的众多团体的参与。而且,美国计算机协

到稿日期:2010-04-13 返修日期:2010-07-16 本文受四川省科技厅重点实验室“可视化计算与虚拟现实”项目(2008JY010522)资助。

牟琴(1985-),女,硕士,主要研究方向为教育技术,E-mail:284598394@qq.com;谭良(1972-),男,博士后,教授,主要研究方向为虚拟技术。

会(ACM)2008年在网上公布对CC2001(CS2001)进行的中期审查报告(CS2001 Interim Review)(草案)中,就明确将“计算思维”与“计算机导论”课程绑定在一起,并明确要求该课程讲授计算思维的本质^[3];美国国家计算机科学技术教师协会(CSTA)在网上发布了得到美国微软公司支持的《计算思维:一个所有课堂问题解决的工具》(Computational Thinking: A problem solving tool for every classroom)报告,对什么是计算思维进行了总结^[4];另外,计算思维还直接促成美国国家科学基金会(NSF)重大基金资助计划CDI(Cyber-Enabled Discovery and Innovation, Cyber 能够实现的科学发现与技术创新)的产生,CDI计划旨在使用计算思维(特别是在该领域产生的新思想、新方法)促进美国自然科学和工程技术领域产生革命性的成果。CDI的最终研究成果将使人们的思维模式发生转变。这种以“计算思维”为核心的转变,要反映在美国国家自然科学与工程,以及社会经济与技术等各个学科领域。任务书认为,这种转变将进一步保持美国在自然科学与工程等领域所具有的世界领先地位^[5,6]。

计算思维不仅影响着美国,也影响着英国的教育,在英国的爱丁堡大学,人们在一连串的研讨会上探索与计算思维有关的主题。每次研讨会,都有不少专家讨论计算思维对他们学科的影响。研讨会上所涉及的学科已延伸到哲学、物理、生物、医学、建筑、教育等各个不同的领域^[7]。另外,英国计算机学会(BCS, British Computer Society)也组织了欧洲的专家学者对计算思维进行研讨,提出了欧洲的行动纲领^[8]。

在国内,桂林电子科技大学董荣胜教授、中国科学院计算技术研究所所长李国杰、自动化所的王飞跃教授^[9,11]、国防科技大学的朱亚宗教授等多位专家学者在这方面都有一些有益的探索。

2008年10月31日至11月2日,我国高等学校计算机教育研究会在桂林召开了一次关于“计算思维与计算机导论”专题学术研讨会,探讨了科学思维与科学方法在计算机学科教学创新中的作用。来自全国80多所高校,包括70多位计算机学院院长、主管教学副院长在内的近百名专家出席了会议。根据“计算思维”领域的研究以及它在科技创新与教育教学中的重要作用,探讨在教学过程中如何以课程为载体讲授面向学科的思维方法,以共同促进国家科学与教育事业的进步。会议收录了计算思维相关的论文50余篇,同时由国家核心期刊《计算机科学》杂志专集出版会议论文集^[12]。2008年12月2日,暨南大学计算机科学系何明昕副教授作了题为“学习与计算思维”的讲座^[13]。2009年7月26日,中国工程院院士、中科院计算技术研究所所长李国杰在NOI2009开幕式和NOI25周年纪念会上的讲话提到:“计算思维是运用计算机科学的基础概念去求解问题、设计系统和理解人类的行为,它选择合适的方式去陈述一个问题,对一个问题的相关方面建模并用最有效的办法实现问题求解。有了计算机,我们就能够用自己的智慧去解决那些计算时代之前不敢尝试的问题^[14]。”11月9日,在“中国信息技术已到转变发展模式关键时刻”一文中,李国杰在展望未来信息技术的发展前景时指出:“20世纪后半叶是以信息技术发明和技术创新为标志的时代,预计21世纪上半叶将兴起一场以高性能计算和仿真、网络科学、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命,信息科学的突破可能会使21世纪下半叶出现一场新的信息技术

革命^[15]。”2009年12月27日,中国计算机学会青年计算机科技论坛哈尔滨分论坛(YOCSE 哈尔滨)与哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院青年沙龙共同举办了“计算思维”专题论坛的会议。哈工大计算机学院副院长王亚东教授做了题为《计算与计算思维》的报告。报告从科学技术发展的角度出发,讲述了各种计算思维已经和即将对各部门学科产生的影响,然后谈到应该在计算机专业的各门课程中渗透“计算思维”的设想,最后号召大家总结都有哪些类计算思维,它们和各门课程,以及日常生活和其它学科都有什么关系^[16]。2010年3月8日到9日,中科院计算技术所召开2010年春季战略规划研讨会。常务副所长孙凝晖代表所务会做了计算所“十二五规划”的报告。他在报告中指出,信息社会经历了模拟时代、数字社会后,即将进入泛在社会,并将逐渐演变到人、机、物共生的、无处不在的信息网络世界。计算所要抓住信息技术领域未来10~15年的机遇期,巩固已有的良好基础,应对长期存在的多样性挑战,找准“国”字当头的核心使命,在计算思维的定位中寻找方向,努力确立计算所在国家创新体系中的地位^[17]。

目前,无论是国外还是国内,计算思维的研究均已展开并取得了一定的成果,但对于计算思维的历史沿革(发展阶段)、概念、原理以及在教学中的培养等都没有一个统一的认识。计算思维从何而来?它究竟是一种什么样的思维?它具有什么样的原理和特征?如何在教学中培养计算思维等问题仍然没有解决。目前,国内外还尚未有文献详细而全面地对这些问题进行归纳总结。为了对此研究有一个总体的把握,并促进国内在该方向上的研究,综述计算思维的研究及其进展工作十分有意义。

本文首先以时间为线索,根据计算思维的形成特点,提出了萌芽时期、奠基时期和混沌时期的阶段划分方法,对计算思维的形成和发展过程进行了全面的分析,给出了计算思维演化进程的一个全景视图;然后重点综述了计算思维的关键内容,包括计算思维的概念、计算思维的原理以及计算思维在教学中的应用等,并进行了总结。结合已有的研究成果,展望了计算思维未来的研究方向及其面临的挑战。

2 计算思维的发展阶段划分

计算思维不是今天才有的,它早就存在于中国的古代数学之中,只不过周以真教授使之更清晰化和系统化。本节以时间为线索,提出了计算思维萌芽时期、奠基时期和混沌时期的阶段划分方法,对计算思维的形成和发展过程进行了全面的分析,给出了计算思维演化进程的一个全景视图,如图1所示。

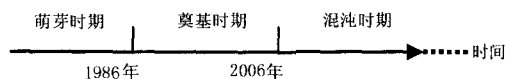


图1 计算思维发展的阶段划分

2.1 计算思维的萌芽时期

计算是人类文明最古老而又最时新的成就之一。从远古的手指计数,经结绳计数,到中国古代的算筹计算、算盘计算,到近代西方的耐普尔骨牌计算及巴斯卡计算器等机械计算,直至现代的电子计算机计算,计算方法及计算工具的无限发展与巨大作用,使计算创新在人类科技史上占有异常重要的

地位。众所周知的高科技医疗器械 CT,即是 X 射线技术与计算技术相结合的创新,其理论的首创者和器械的首创者共同获得了 1979 年诺贝尔医学和生理学奖。其他与计算有关的诺贝尔奖获得者还有:威尔逊因重正化群方法获 1982 年物理学奖,克鲁格因生物分子结构理论获 1982 年化学奖,豪普曼因 X 光晶体结构分析方法获 1985 年化学奖,科恩与波普尔因计算量子化学方法获 1998 年化学奖。而闻名遐迩的中国科学大师华罗庚的“华-王方法”、冯康的有限元方法,以及吴文俊的“吴方法”,也均是计算有关的重大科学创新^[18]。但是,尽管取得了如此巨大的成绩,此时的计算并没有上升到思维科学的高度,没有思维科学指导的计算具有一定的盲目性,且缺乏系统性和指导性。

另一方面,思维方式是人类认识论研究的重要内容,已有无数的哲学家、思想家和科学家对人类思维方式进行过各具特色的研究,并提出过不少深刻的见解。在思维的纵向历史性方面,恩格斯曾有精辟的论述:“每一时代的理论思维,包括我们时代的理论思维,都是一种历史的产物,在不同的时代具有非常不同的形式,并因而具有非常不同的内容。因此,关于思维的科学与其他任何科学一样,是一种历史的科学,关于人的思维的历史发展的科学^[19]。”而在思维方式横向分类方面,也有不少普遍认可的成果:抽象(逻辑)思维与形象思维、辩证思维与机械思维、创造性思维与非创造性思维、社会(群体)思维与个体思维、艺术思维与科学思维、原始思维与现代思维、灵感思维与顿悟思维^[18],等等。但是,此时的思维方式仅仅是认识论的一个分支,没有提升到学科的高度,缺少完整的学科体系。

20 世纪 80 年代,钱学森在总结前人的基础之上,将思维科学列为 11 大科学技术门类之一,与自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、行为科学、军事科学、地理科学、建筑科学、文学艺术并列在一起^[20-21]。经过 20 余年的实践证明,在钱学森思维科学的倡导和影响下,各种学科思维逐步开始形成和发展,如数学思维、物理思维等,这一理论体系的建立和发展也为计算思维的萌芽和形成奠定了基础。因此,将这一时期称为计算思维的萌芽时期。

2.2 计算思维奠基时期

自从钱学森提出思维科学以来,各种学科在思维科学的指导下逐渐发展起来,计算学科也不例外。1992 年,文献^[22]给出了计算思维的定义:“计算思维就是思维过程或功能的计算模拟方法论,其研究的目的是提供适当的方法,使人们能借助现代和将来的计算机,逐步达到人工智能的较高目标。”2002 年,文献^[23,24]提出并构建了计算机科学与技术方法论(Methodology of Computer Science and Technology);文献^[25]在计算思维和计算机方法论的研究中指出,计算思维与计算机方法论虽有各自的研究内容与特色,但它们的互补性很强,可以相互促进,计算机方法论可以对计算思维研究方面取得的成果进行再研究和吸收,最终丰富计算机方法论的内容;反过来,计算思维能力的培养也可以通过计算机方法论的学习得到更大的提高。指出两者之间的关系与现代数学思维和数学方法论之间的关系非常相似。另外,在 2005 年的文献^[26]中作者这样描述计算思维能力:“它是形式化描述和抽象思维能力以及逻辑思维方法,它在形式语言与自动机课程中得到集中体现。”

在这一时期,尽管出现了“计算思维”,但它并没有引起国内外计算机学者的广泛关注。直到 2006 年,周以真教授对计算思维进行详细分析,阐明其原理,并将其以“Computational Thinking”命名发表在 ACM 的期刊上,从而使这一概念一举得到了各国专家学者,乃至包括微软公司在内的一些跨国机构的极大关注。与前面的成果相比较,周以真教授提出的计算思维更加清晰化和系统化,并具有可操作性,为国内外计算思维发展起到了奠基和参考的作用。因此,将这一时期称为计算思维的奠基时期。

2.3 计算思维混沌时期

2006 年以后,国内外计算机教育界、社会学界以及哲学界的广大学者围绕周以真教授的“计算思维”进行了积极的探讨和争论。学者们依据自己的知识背景、从不同的视角提出了一些新的观点。2008 年 1 月,周以真教授针对计算领域提出了 $P=NP?$ 什么是可计算的? 什么是智能? 什么是信息? 我们如何简单地建立复杂系统等 5 个深层次的问题,并进行了详细的叙述^[27]。她认为计算机科学是计算的学问——即什么是可计算的,怎样去计算? 而就这个原因提出了计算思维的 6 个特征:“概念化,不是程序化;根本的,不是刻板的技术;是人的,不是计算机的思维方式;数学和工程思维的互补与融合;是思想,不是人造物;面向所有的人,所有地方^[1,2]。”同年 7 月,她在《计算思维和关于思维的计算》文章中指出:计算思维将影响每一个奋斗领域的每一个人,这一设想为我们的社会,特别是为我们的青少年提供了一个新的教育挑战。关于思维的计算,我们需要结合三大驱动力领域:科学、科技和社会。社会的巨大发展和科技的进步迫切要求我们重新思考最基本的科学的问题^[28]。

桂林电子科技大学计算机学院的董荣胜教授支持周以真教授的这种观点,他指出计算机方法论中最原始的概念:“抽象、理论、设计”与计算思维最基本的概念:“抽象和自动化”反映的都是计算最根本的问题:什么能被有效地自动执行^[25]。河北北方学院与河北师范大学郭喜凤等人指出周以真教授的计算思维仅是一种观点在发表,目的是为吸引更多有志青年学习计算机科学,而这种观点既没有考虑选择计算机科学学习的经济学分析,又与 CC2005 中将 Computing(对应国内的计算机或计算机科学)划分为计算机科学、计算机工程、软件工程、信息工程和信息系统的范围存在明显的不一致。在对比 Computational 和 Computing 的基础之上,认为前者的概念相对后者而言更具体、更狭窄。从而指出周以真教授的计算思维具有一定的局限性,并认为信息学思维或计算机思维才能更好地对应 Computing Thinking^[29]。与此同时,国防科技大学人文学院的朱亚宗教授站在人文历史的基础之上,把计算思维归类为三大科学思维(实验思维、理论思维、计算思维)之一^[18]。

目前,计算思维究竟是一种什么思维? 它具有什么样的作用? 对将来社会有何影响? 不同的学者对这些问题的认识分歧较大,从而形成了当今这样一个混沌的局面。因此,称这一时期为计算思维的混沌时期。

3 计算思维的关键内容

3.1 计算思维的概念、方法和特征

究竟什么是“计算思维”是计算思维研究的最为关键的内

容之一。如果我们连研究对象的基本概念都没有弄清楚,研究的学者们在这方面均未达成统一的认识,那么在这一领域很难取得突破性进展。目前,许多学者在这一问题上进行了探索。

文献[22]认为,计算思维是思维过程或功能的计算模拟方法论。其目的是为了提供适当的方法,使人们能借助现代和将来的计算机,逐步达到人工智能的较高目标,诸如模式识别、决策、优化、自控等的有关算法都可属于计算思维的范畴。该计算思维的核心内容注重通过对人脑思维规律的认识,建立一些与人脑思维模式更加相像的计算方法。随后,通过这些方法的实践,提供宝贵的反馈信息,校正我们对思维规律的认识,而较完善的认识又指导我们建立更好的计算方法。周而复始,对人脑思维规律的认识会越来越清楚,有关计算思维的方法也会越来越有效。尽管这个观点将计算和思维紧密结合起来,但是其核心是用“计算来模拟人脑思维”,主体是计算,核心是如何让计算具有思维特征。

文献[26]认为,计算思维能力是形式化描述和抽象思维能力以及逻辑思维方法。计算思维能力在形式语言与自动机课程中得到集中体现;其基本理论和方法在编译原理课程中得到了具体的应用,而编译原理课程本身的重要内容关系到程序设计与实现能力的培养。该文献尽管没有明确说出计算思维的概念,仅在针对某一门课程教学的时候提出计算思维能力的培养,但指出了计算思维能力是形式化描述和抽象思维能力以及逻辑思维方法,在计算科学和思维两方面说明了这样的一种思维能力,思维能力是主体,核心是如何让思维具有计算特征。

美国卡内基·梅隆大学周以真教授定义的计算思维是:计算思维是运用计算机科学的基本概念去求解问题、设计系统和理解人类的行为。它包括了涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动,并详细阐述了这样的一种思维:计算思维就是通过约简、嵌入、转化和仿真等方法,把一个看来困难的问题重新阐释成一个我们知道怎样解决的问题。计算思维是一种递归思维。它并行处理。它把代码译成数据,又把数据译成代码。计算思维采用了抽象和分解来迎接庞杂的任务或者设计巨大复杂的系统。它是关注的分离(SOC方法)。计算思维是按照预防、保护及通过冗余、容错、纠错的方式从最坏情形恢复的一种思维。它称堵塞为“死锁”,称约定为“界面”。计算思维利用启发式推理来寻求解答,即不确定情况下的规划、学习和调度。它就是搜索、搜索、再搜索,结果是一系列的网页、一个赢得游戏的策略或者一个反例。计算思维利用海量数据来加快计算,在时间和空间之间,在处理能力和存储容量之间进行权衡^[1,2]。我们认为,周以真教授定义的计算思维说得很全面,在计算机科学、科学计算^[30]、计算科学、可计算原理等因素对计算思维形成方面的影响都有一定的考虑,是经过不断探索思考出来的结果。且扩散了其原理,阐述了其特征,提出了将来的发展及培养的方向等等。但是,她仍忽略了思维科学这一重要理念对计算思维的影响,因为计算思维首先是一种思维,应该站在思维科学的高度去认识计算思维,受思维科学的指导。不过,目前看来,她应该是对计算思维定义得最明确的一人。

桂林电子科技大学董荣胜等就“思想与方法”更改了周以真教授定义的计算思维中的“基础概念”,得出了计算思维新

的定义:计算思维是运用计算机科学的思想与方法去求解问题、设计系统和理解人类的行为,它包括了涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动。他认为,计算思维与计算机方法论的研究,与现代数学思维与数学方法论的研究有很多相似之处。计算思维从学科思维这个层面直接讨论学科的根本问题与学科的思维方式,计算机方法论则是从方法论的角度去讨论学科的根本问题和学科形态。二者之间互补性很强,可以相互促进。计算机方法论中最原始的概念为抽象、理论和设计,与计算思维最基本的概念抽象和自动化反映的都是计算思维最根本的问题:什么能被有效地自动进行^[6]。董荣胜等两位教授对计算思维的定义其实和周以真教授的非常相似,仅把周教授的计算科学的基础概念更换为思想和方法。两位教授在方法论方面从事了多年的研究并出版了相应的专著作品,所以,他们的计算思维就从计算机方法论这一侧面去认识计算思维,对计算科学、科学计算等对计算思维的影响也有较深刻的认识。他们的缺陷也是没有把思维科学融合进计算思维这个领域去认识和研讨。

文献[18]认为,自然科学领域公认有三大科学方法,即理论方法、实验方法与计算方法。而每一种科学都可以分析为思想方法与操作方法两个层面,如果说其中思想方法层面大致可以认为是思维方法层面的话,则与三大科学方法相对应,便有三大科学思维,即是理论思维、实验思维与计算思维。我们认为,该文将计算方法认定为三大科学方法这一观点还值得商榷,因为计算方法也是理论方法或实验方法之一。如何定位计算思维还有待进一步研究。

文献[29]对周以真的计算思维进行了深刻的评价和分析,并认为:ACM/IEEE CC在CC2005将Computing(对应国内的计算机或计算机科学与技术)划分为计算机科学、计算机工程、软件工程、信息技术和信息系统。而周以真教授计算思维中的计算是Computation(计算机科学),而不是Computing。ACM/IEEE CS在CC2005中用的是Computing而不是Computation。Computing是处理Computation和符号操作的科学和技术。因此,周以真教授计算思维的观点有一定的局限性,不是经过深入科学论证得到的结果,同时,周教授的文章没有包含任何的参考文献,只作为“观点”在发表。所以,周以真教授的计算(Computational)思维不完全适合我们的计算机科学与技术的教学与研究,虽然对我们理解计算学科有一定的帮助,因为她的计算思维大多是基于计算机科学的,忽略了计算机工程、软件工程、信息技术和信息系统,而这些专业或学科是国内正在努力发展的,特别是软件工程和信息系统尚未在国内的高校中普及。我们需要的是Computing Thinking,而不仅仅是Computational Thinking,他们认为计算思维的扩展性是说计算机思维,信息学思维是最好地对应Computing Thinking较好的概念。该文献尽管从Computational和Computing的语义上去认识计算思维,略显吹毛求疵,但不失为一种科学态度。

总之,计算思维的概念在学者之间还没有统一的共识,每位学者对计算思维都有自己独到的见解。而对于计算思维的特征和方法,只有周以真给出自己的看法。她认为,计算思维具有6个特征(概念化,不是程序化;根本的,不是刻板技能;是人的,不是计算机的思维方式;数学和工程思维的互补与融合;是思想,不是人造物;面向所有的人,所有地方)以及

系列广泛的计算机科学的思维方法(递归,抽象和分解,保护、冗余、容错、纠错和恢复,利用启发式推理来寻求解答,在不确定情况下的规划、学习和调度,等等)。而其它学者在这方面还缺少系统的观点。但是我们不难发现,随着争论的延续,人们对计算思维的理解逐渐向以下两个方向靠拢:

- 以思维科学为基础,以计算为核心的人工智能方向;
- 以计算为基础,以思维科学为核心的认识论方向。

目前,这两个方向均忽略了思维科学的基础、指导作用,因而得出的计算思维并不准确。

3.2 计算思维的原理

对于计算思维的原理这一问题,在我们的参考文献阅读范围内,目前只对计算思维的基本原理进行了详细的论述。该文作者认为计算思维的原理包括可计算性原理、形理算一体原理和机算设计原理^[18]。

所谓可计算性原理亦即计算的可行性原理。1936年,英国科学家图灵提出了计算思维领域的计算可行性问题:即是怎样判断一类数学问题是否是机械可解的,或者说一些函数是否可计算。所谓形理算一体原理,即是针对具体问题应用相关理论进行计算发现规律的原理。在计算思维领域,就是从物理图像和物理模型出发,寻找相应的数学工具与计算方法进行问题求解。所谓机算设计原理,就是利用物理器件和运行规则(算法)相结合完成某个任务的原理。在计算思维领域,最显著的成果就是电子计算机的创造(计算机的设计原理),比如,电子计算机构成就是五个外部设备(计算器、运算器、存储器、输入设备、输出设备)以及运用二进制和存储程序的概念来达到解决问题的目的。

尽管该文献对计算思维的原理进行了剖析,并认为可计算性原理、形理算一体原理与计算机设计原理等3大计算机基本原理是计算思维的原理,但是该文仅仅从计算的角度归纳,没有在思维科学层面上考虑,缺少思维科学指导的计算思维的原理不符合思维科学基本特征。目前这一工作还没有任何进展。

3.3 计算思维在教学中的应用

尽管计算思维的学科体系尚未成熟,但在教学和培训中的应用和推广正逐步开展。一些计算机教育者在教学过程中推进计算思维能力的培养。标志性的事情包括2008年美国国家计算机科学技术教师协会(CSTA)在网上发布了得到美国微软公司支持的《计算思维:一个所有课堂问题解决的工具》(Computational Thinking: A problem solving tool for every classroom)报告;以及ACM在网上公布了对CS2001(CC2001)进行中期审查的报告(CS2001 Interim Review)(草案),开始将美国卡内基·梅隆大学计算机科学系教授周以真倡导的“计算机思维”与“计算机导论”课程绑定在一起,并明确要求该课程讲授计算机思维的本质。美国计算机科学技术教师协会认为,计算思维应当是所有学校所有课堂教学都应当采用的一个工具。采用这个工具,教师自然会问以下几个问题:

- (1)人所固有的能力与局限性? 计算机的计算能力与局限性?
- (2)问题到底有多复杂? 也即,问题解决的时间复杂性? 空间复杂性?
- (3)问题解决的判定条件是什么?

(4)什么样的技术(各种建模技术)能被应用于当前的问题求解或讨论之中?

(5)什么样的计算策略更有利于当前问题的解决?

在国内,董荣胜教授早在2002年就提出并构建了计算机科学与技术方法论(Methodology of Computer Science and Technology),并将计算机科学与技术方法论的思想应用于教学实践。为便于大学一年级学生的学习,作者撰写了《计算机科学与技术方法论》(人民邮电出版社2002年9月出版)一书。计算机科学与技术方法论是对计算领域认识和实践过程中一般方法及其性质、特点、内在联系和变化发展进行系统研究的学问。计算机科学与技术方法论是认知计算学科的方法和工具,也是计算学科认知领域的理论体系。为了进一步在大学生中推进计算思维的培养,2007年,作者又撰写了《计算机科学导论——思想与方法》(高等教育出版社2007年9月出版)一书。据统计,目前,已有北京大学、华中科技大学、中国地质大学、兰州大学、新疆大学、广西大学、江西财经大学、山东工商学院、桂林电子科技大学等国内近百所大学将《计算机科学与技术方法论》与《计算机科学导论——思想与方法》两本书选为“计算机方法论”或“计算机导论”课程的教材或主要教学参考书。

另外,文献[31]中提出引入计算思维关注点分离的方法解决软件工程课程中的问题求解、算法设计、软件设计等设计方法以及软件开发过程、软件项目管理和软件开发方法学等诸多方面的问题,并指出:作为最重要的计算思维原则之一,关注点分离是计算科学和软件工程在长期实践中确立的一项方法论原则。文献[32]就如何在离散数学课堂教学中引导学生利用计算思维去解决离散数学中的相关问题进行了探讨,分别就模型与数理逻辑、递归与等价关系数目的求解、模块化与群、等价关系证明等问题介绍了计算思维在离散数学课堂教学中的应用,文献[33]结合教学实践及目前人才市场的需求,探讨了当前《图像处理》课程教学中存在的问题,并从教学内容、教学方法、实践教学等几个方面,阐述了计算思维在《图像处理》教学中的实践及应用,等等。

对于在研究工作上如何采用计算思维,著名的计算机科学家、图灵奖获得者詹姆斯·格雷(James Gray)认为,一项研究,其研究的问题应该具有以下特点^[34]:

- (1)可理解性:目标应能简单表述并被人理解;
- (2)有挑战性:如何达到目标不是很明显的;
- (3)用途广泛:不只对计算机科学家有用,而是对大多数人有用;
- (4)可测试性:以便检查项目进展并知道目标是否已经达到;
- (5)渐进性:中间有若干里程碑,以检查项目进展并鼓舞研究人员干下去。

目前,尽管计算思维已在教学当中逐步应用,但是,计算思维本身还未成为独立的学科体系,并且在教学中的应用都是少数专家学者在进行小规模探索性的实验性教学,在培养过程中没有系统性的应用计算思维的系列方法,因此效果并不明显。

4 亟待解决的问题

4.1 计算思维学科体系的建立

美国教育家伯顿·克拉克在《高等教育新论》中认为,学

科包括两种涵义:一是作为一门知识的“学科”,即知识形态的学科;二是围绕这些“学科”而建立起来的组织,即组织形态的学科。所谓知识形态的学科,按照《辞海》的解释,也有两方面的含义:一是学术的分类,指一定的科学领域或科学分支,如自然科学中的物理学、生物学,社会科学中的史学、教育学等;二是指教学的科目,是学校教学内容的基本单位,如数学、外语等。所谓组织形态的学科,是一个由学者、知识信息及学术资料(学者的生产资料)所组成的实体化了的组织体系。学者是学科组织的主体,知识信息是学者活动的对象,学术资料是学者进行学术活动的物质基础。

对于计算思维来讲,要成为一门学科,还有很长的路要走。目前,计算思维还不是知识形态的学科,因为其本身的概念、原理、特征、培养方法论以及创新方法论等方面的知识体系并未形成,也不是大多数学校或研究所教学内容的基本单位。这方面的学者、知识信息及学术资料所组成的实体化组织虽然正在形成,但远远未达到成熟。另外,各国的教育行政主管部门还没有完全认识到计算思维的重要性。因此,计算思维学科体系的建立任重而道远。

4.2 计算思维能力的培养方法论

在教育领域,对学生计算思维能力的培养已经逐渐展开。一些国家的教育主管部门或教育组织也非常重视对学生计算思维能力的培养,并把计算思维能力的培养纳入课程的考核体系。但是,目前计算思维能力的培养仍然处于一个摸索阶段,还没有形成一套完整的方法体系。教师们教学中对学生计算思维能力的培养仍然是不自觉的、小规模、探索性的,而不是自觉的、大规模的、系统化的。

在我国,已出版有《计算机科学与技术方法论》、《计算机科学导论—思想与方法》等完整的计算机方法论方面的学术专著。对于刚刚起步的计算思维而言,这些成果有较好的指导作用。

4.3 计算思维能力的创新方法论

创新是一个民族进步的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力。21世纪是知识经济的时代,其核心在于创新,包括知识创新和技术创新,而知识创新和技术创新能否实现的核心问题取决于人,取决于人的创新精神、创新意识和创新能力。因而在新世纪新型人才的培养变成了时代向教育事业提出的课题。只有不断地培养出具有创新意识和创新能力的创新型人才,才能使我们有能力参与日益激烈的国际竞争,并且保证我们在竞争中立于不败之地。这就要求我们高校必须重视并加强大学生创新能力的开发和培养。

计算思维具有强大的创新能力,培养计算思维能力的最高目标是为了创新。但是,目前缺少应用计算思维进行创新的方法论,即如何应用计算思维进行创新。这方面的工作仍然非常艰巨。

结束语 当今世界是一个竞争的时代,核心竞争力是人才。计算思维是创新性人才的基本素质和要求之一,这个领域产生的新思想、新方法,会促进世界自然科学和工程技术领域产生革命性的成果;这方面的研究成果将使人们的思维模式发生转变,这种以“计算思维”为核心的转变,会反映在自然科学与工程,以及社会经济与技术等各个学科领域。要想在自然科学与工程等领域取得世界领先地位,开展计算思维的研究和培养十分必要。

本文以时间为线索,根据计算思维的形成特点,提出了自己对计算思维发展的阶段划分方法,进而分析了计算思维的形成和发展,给出了计算思维演化全景;对计算思维的概念、原理及其在教学中的应用进行了重点综述和总结。结合已有的研究成果,展望了计算思维未来的研究方向及其面临的挑战。

参考文献

- [1] Wing J M. Computational Thinking[J]. Communication of the ACM, 2006, 49(3): 33-35
- [2] 周以真. 计算思维[J]. 中国计算机学会通讯, 2007, 3(11)
- [3] CS2001 Interim Review [EB/OL]. http://wiki.acm.org/cs2001/index.php?title=main_page, 2008
- [4] Philips P. Computational Thinking: A problem-solving tool for every classroom [EB/OL]. <http://www.csta.acre.org/Resources/sub/ResourceFiles/ComputationalThinking.pdf>, 2008
- [5] Cyber-enabled Discovery and Innovation (CDI) [EB/OL]. <http://www.nsf.gov/crssprgm/cdi/>
- [6] 董荣胜, 古天龙. 计算思维与计算机方法论[J]. 计算机科学, 2009, 36(1): 1-4, 42
- [7] Bundy A. Computational Thinking is Pervasive[J]. Journal of Scientific and Practical Computing, Noted Reviews, 2007, 1(2): 67-69
- [8] BCS. The science of thinking; Europe's next policy challenge [EB/OL]. <http://www.sciencebusiness.net/documents/thinking.pdf>, 2008
- [9] 王飞跃博客. <http://www.sciencetimes.com.cn/u/王飞跃/>
- [10] 王飞跃. 从计算思维到计算文化[J]. 中国计算机学会通讯, 2007, 3(11)
- [11] 王飞跃. 计算思维与计算文化[N]. 科学时报, 2007-10-12
- [12] 全国“计算思维与计算机导论”专题学术研讨会纪要 [EB/OL]. <http://www.gljpkc.com/jsjxdl/fushe4.asp>
- [13] 学习成长与计算思维——2008年暨南大学研究生文化艺术节系列讲座 [EB/OL]. <http://gs.jnu.edu.cn/ReadNews.asp?NewsID=848>
- [14] 在 NOI2009 开幕式和 NOI 25 周年纪念会上的讲话 [EB/OL]. <http://www.student.gov.cn/bjnoi/aosaidt/bjdt/247774.shtml>
- [15] 李国杰. 中国信息技术已到转变发展模式关键时刻 [EB/OL]. http://www.ict.ac.cn/xwzx/mtwz/200911/t20091109_2650735.html
- [16] YOCSEF 哈尔滨与哈工大计算机学院青年沙龙共同举办“计算思维”专题论坛 [EB/OL]. <http://www.yocsef.org.cn/mcti/showNews.jsp?newsId=201200000041>
- [17] 计算所召开 2010 年春季战略规划研讨会 [EB/OL]. <http://search.cas.cn/search>
- [18] 朱亚宗. 论计算思维——计算思维的科学定位、基本原理及创新路径[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 53-55, 93
- [19] 马克思, 恩格斯. 马克思恩格斯选集(第三卷)《自然辩证法》[M]. 北京: 人民教育出版社
- [20] 北京大学现代科学与哲学研究中心. 钱学森与现代科学技术 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2001: 157
- [21] 钱学森. 关于思维科学 [M]. 上海人民出版社, 1986: 13
- [22] 黄崇福. 信息扩散原理与计算思维及其在地震工程中的应用 [M]. 北京: 北京师范大学, 1992
- [23] 董荣胜, 古天龙. 计算机科学与技术方法论 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002

(下转第 50 页)

调整,路由方向感逐渐体现,路径长度逐渐降低。图3显示,QRRO平均路径长度要比Index小6跳左右,消耗较少的消息数获得较高的搜索成功率,能够节省网络带宽,提高响应速度。从另一个侧面,如果消息消耗量确定,QRRO将能够发现更多可供选择的候选数据副本。

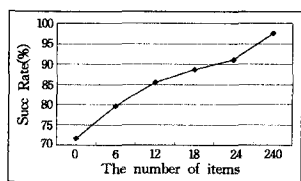


图4 QRRO搜索成功率与数据属性记录条数的关系

数据属性列表记录了数据的访问频率信息,查询消息需要依靠记录中的访问频率信息进行路由。每个节点的记录条数越多,查询消息知道访问频率的概率就越大,查询消息路由转发就越有效。图4显示,随着记录条数增多,搜索成功率不断提高。但是增长幅度逐渐减小,当记录条数由0变为6(文件数1/40)时提高了8个百分点;由6到12提高了5个百分点;幅度越来越小。这主要是因为,如果在TTL范围内能够以很小跳数很大概率获取查询数据访问频率,那么再次添加更多重复记录,其价值会降低。当记录条数为240,意味着每次搜索在第一次转发时就知道查询访问频率,即为最理想情况,此时的搜索成功率为97.6%。

结束语 本文提出了一种基于非语义访问频率信息的搜索算法。每个节点拥有一个权重标识;节点只为访问频率与权重标识接近的数据建立索引。数据属性与存储节点之间的耦合关系形成,权重标识反映了其存储数据的特点,可以作为特征信息成为邻居之间交换信息的一部分。通过查询数据访问频率与邻居节点权重标识的比对形成路由方向感,提高消息转发的有效性。

QRRO与结构化P2P相比,有两个差别:(1)QRRO中的节点不会基于标识形成次序关系,邻居连接不会组成规则拓扑结构。其目的在于,不让频繁的节点加入退出带来频繁的网络调整和数据移动,降低维护代价。(2)标识的生成方式不同,传统的结构化P2P采用SHA-1等哈希算法为节点和数据生成随机标识,而QRRO采用了具有统计意义的访问频率作为标识。这样的好处在于,数据和节点之间是松耦合而不是紧耦合关系,适合于无结构化的P2P搜索模式;可以借助访问频率信息方便灵活地实现负载均衡;可以调整索引记录的条数,从而优化搜索成功率。

QRRO的一个重要缺陷在于不能灵活支持关键字搜索。

我们可以用如下方法弥补:数据共享时用户给出数据关键字;关键字随数据的索引记录、数据的属性记录共存,数据关键字和相关属性可以互查;遇到多个匹配关键字再生walker。这些问题将在后续工作中展开。

参考文献

- [1] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM'01, San Diego, September 2001
- [2] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. Scalable content-addressable network[J]. Proceedings of the 2001 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, 2001, 31(4): 161-172
- [3] Lv Q, Cao P, Cohen E, et al. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks[C]//Proc. of the 16th ACM Int'l Conf. on Supercomputing (ICS 2002). New York: ACM Press, 2002: 84-95
- [4] Cohen E, Shenker S. Replication strategies in unstructured peer-to-peer networks[C]//Proc. of ACM SIGCOMM'02, San Diego, CA, USA, Aug. 2002
- [5] Feng Guofu, Jiang Yuquan, Chen Guihai, et al. Replication Strategy in Unstructured Peer-to-Peer Systems[C]//Proc. IPDPS'07, Long Beach, CA, USA, March 2007: 26-30
- [6] Cooper B F. An optimal overlay topology for routing peer-to-peer searches[C]//the Proc. of Middleware 2005
- [7] 冯国富, 张金城, 姜玉泉, 等. 无结构P2P覆盖网络的拓扑优化[J]. 软件学报, 2007, 18(11)
- [8] Yang B, Garcia-Molina H. Improving search in peer-to-peer networks[C]//Rodrigues L E T, Raynal M, Chen W S E, eds. Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. Washington: IEEE Computer Society, 2002: 5-14
- [9] Adamic L A, Lukose R M, Puniyani A R, et al. Search in Power-law Networks[J]. Phys. Rev., 2001(E 64)
- [10] Das T, Nandiy S, Ganguly N. Community based search on power law networks[C]//3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COM-SWARE 2008). Jan. 2008: 279-282
- [11] 周晋, 路海明, 李衍达. 用Small-World设计无组织P2P系统的路由算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 915-923
- [12] 周晓波, 周健, 卢汉成, 等. 一种基于层次化兴趣的非结构化P2P拓扑形成模型[J]. 软件学报, 2007, 18(12): 3131-3138
- [13] 冯国富, 毛莺池, 陆桑璐, 等. SWAPS: 一种基于Small World的文件搜索算法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(3): 395-401
- [14] Waxman B. Routing of Multipoint Connections[J]. IEEE J. Select. Areas Communications, 1988, SAC-6(9): 1617-1622
- [15] 董荣胜. 计算机科学导论——思想与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [16] 董荣胜. 计算思维与计算机导论[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 50-52
- [17] 陈文字, 吴祖峰, 罗宗粉, 等. 计算机专业本科生计算思维能力的培养[C]//电子科技大学本科教学改革的实践与研究论文集. 2005
- [18] Wing J M. Five Deep Questions in Computing[J]. CACM, essay, 2008, 51: 158-160
- [19] Wing J M. Computational Thinking and Thinking About Computing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2008, 366: 3717-3725
- [20] 郭喜凤, 孙兆豪, 赵喜清. 论计算思维工程化的层次结构[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 64-67
- [21] 石钟慈. 第三种科学方法——计算机时代的科学计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 11
- [22] 何明昕. 关注点分离在计算思维和软件工程中的方法论意义[J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 60-63
- [23] 廖伟志, 李文敬, 王汝凉. 计算思维在离散数学课堂教学中的应用[J]. 计算机科学, 2008, 35(11 专辑)
- [24] 李芳, 李一媛, 杨兵. 计算思维在《图像处理》课程中的实践及应用[J]. 计算机科学, 2008, 35(11 专辑)
- [25] 詹姆斯·格雷. <http://202.207.0.245:9001/jisuanjifazhanshi/tuling/33.htm>