

计算 Web 智能研究综述^{*})

段其国 苗夺谦 陈敏 王瑞志

(同济大学计算机科学与工程系 上海 201804)

摘要 计算 Web 智能是近年来提出的一个崭新的研究方向,它结合了计算智能和 Web 技术,致力于提高 Internet 和无线网络上电子商务等 Web 应用的智能化程度。首先分析了计算 Web 智能的研究背景,然后阐述了计算 Web 智能的概念和相关技术,概括了计算 Web 智能当前的主要研究内容和应用,最后展望了计算 Web 智能未来的研究方向及面临的挑战。

关键词 计算 Web 智能,计算智能,Web Agent,粗糙集,粒度计算

Overview of Researches on Computational Web Intelligence

DUAN Qi-Guo MIAO Duo-Qian CHEN Min WANG Rui-Zhi

(Department of Computer Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract Computational Web Intelligence, a new research area based on both computational intelligence and Web technology, is proposed to increase the intelligent quality of e-Business on the Internet and wireless networks. The background and concepts as well as basic methods of Computation Web Intelligence are firstly described. Then some recent research contents and developments are deeply surveyed. Finally, the future trends and challenges of Computational Web Intelligence are discussed.

Keywords Computational Web intelligence, Computational intelligence, Web agent, Rough set, Granular computing

1 引言

随着 Internet 技术的迅猛发展和电子商务等 Web 应用的日益广泛,Web 上的数据量正以几何级数的方式激增,随之而来的问题是 Web 数据的模糊性、粗糙性、随机性、可能性等不确定性特征的日益突出。在处理不确定的 Web 数据和信息时,当前的 Web 技术难以进行有效的知识发现和决策制定。Web 的不确定性问题已经成为了制约电子商务、知识发现和搜索引擎等 Web 应用发展的关键环节,如何解决 Web 的不确定性问题将是发展语义 Web 和推动 Web 应用发展所要面对的一个长期挑战。正是在这样的背景下,一个崭新的研究方向——计算 Web 智能(Computational Web Intelligence, CWI)^[1,2]应运而生,并逐渐成为一个新的研究热点。

Yan-Qing Zhang 和 T. Y. Lin 在 2002 年国际计算智能大会(WCCI2002)中的 FUZZ-IEEE'02 会议上首次提出了 CWI 的概念。CWI 的研究可以追溯到许多相关领域的研究工作,如计算智能、软计算方法、粗糙集、模糊集、神经网络、智能 Agent 和多 Agent 系统等,这些领域在不同程度上都涉及到了在 Web 上的应用研究。CWI 的提出具有很重要的意义,它将这些分散的研究统一起来,并进一步探索和研究新的理论和技巧,从而推动这些相关领域和 Web 应用的发展。

本文对 CWI 的研究领域和现状进行了综述。本文的组织如下:第 2 节分析了 CWI 的研究背景;第 3 节详述了 CWI 的概念,包括它的定义、涉及到的技术及其与相关领域的比较;第 4 节阐述了 CWI 的主要研究内容;第 5 节列举了 CWI 的相关研究工作;第 6 节指出了 CWI 所面临的挑战,对计算

Web 智能未来的研究进行了展望,指出混合 Web 智能是 CWI 的长期发展方向;最后总结全文。

2 CWI 研究背景

随着有线和无线网络上 Web 数据量的爆炸性增长,在数目众多的网络计算设备中分布着海量的 Web 数据。由于大量的 Web 数据都是模糊的、粗糙的、动态的、不完全的、不一致的和不可靠的,因此 Web 数据往往是不精确的和不确定性的。如何处理不确定性的 Web 数据,如何在具有不确定性的 Web 环境下做出正确的决策等问题成为了发展下一代网络和推动 Web 应用智能化进程所必须要面对的挑战。

人类大脑中的神经细胞存储着海量的生物数据,由于语言上的含糊性和客观世界不断变化和发展所造成的知识局限性等原因,人脑中的生物数据往往是不准确的、不完全的、不可靠的和不确定性的。但人类正是利用这些不精确的、不确定的知识来解决问题和认识客观世界的。计算智能(Computational Intelligence, CI)^[3-7]借鉴了仿生学的思想,用数学语言抽象描述了基于生物体系的进化和神经细胞网络等机制的计算方法,用来模仿生物体系和人类的智能机制,例如模仿人类对模糊现象认知的模糊集理论、模仿生物遗传和进化规律的进化计算和模仿生物神经网络的人工神经网络等都属于 CI。

因为 CI 可以有效地处理不确定的、不完全的、不精确的和不一致的数据和信息,利用 CI 来处理 Web 数据引起了学者的广泛关注和研究,并且已经取得了大量的研究成果。为了推动模糊逻辑在 Internet 上的应用,在 2001 年举行了模糊逻辑与因特网的 BISC 国际研讨会(FLINT2001)^[8],Zadeh 在

^{*}基金项目:国家自然科学基金资助项目(60475019,60175016)。段其国 博士生,研究方向:Web 智能、语义 Web;苗夺谦 教授,博士生导师,主要研究方向:粗糙集、数据挖掘;陈敏 博士生,主要研究方向:Web 挖掘;王瑞志 博士生,主要研究方向:数据挖掘。

会上提出“模糊逻辑将代替古典逻辑,成为互联网的脑件(brainware)”。R. R. Yager 采用模糊逻辑和 Agent 构建了敏捷的电子商务系统^[9]。Yan-Qing Zhang 等采用模糊逻辑、神经网络和 Agent 从过去的股票数据中发现模糊规则后对股票进行预测^[10],采用模糊逻辑、粒度计算和 Agent 设计了个性化的搜索系统^[11]。T. Takagi 和 M. Tajima 将概念化的模糊集理论应用到 Web 搜索引擎中提高了 Web 服务的质量^[12]。W. Pedrycz 等将 CI 应用到了电信网络中^[13]。这些致力于将 CI 和 Web 技术相互结合,提高电子商务等 Web 应用的智能程度,构建智能化 Web 的研究活动促进了 CWI 概念的提出。

3 CWI 概念

3.1 CWI 定义

Yan-Qing Zhang 和 T. Y. Lin 对 CWI 的定义是“计算 Web 智能(Computational Web Intelligence, CWI)是计算智能(Computational Intelligence, CI)和 Web 技术(Web Technology, WT)的混合(hybrid)技术,计算 Web 智能的目标是提高 Internet 和无线网络上电子商务应用的智能性(Quality of Intelligence, QoI)”^[1,2]。这个定义说明了 CI 和 WT 是 CWI 的基础,而 CWI 是 CI 和 WT 的融合,可以用简明的公式表示为: $CWI=CI+WT$ 。

3.2 CI 与 WT

CI 是近 10 年来刚刚兴起的一门新的学科。1992 年,美国西佛罗里达大学的 J. C. Bezdek 首次提出了“计算智能”的概念。目前对于计算智能的定义有很多,还没有达成一致的意见。J. C. Bezdek 给出的定义是“一个系统是计算智能的,当它仅处理低层次的数字信息,具有模式识别元件,没有使用 AI 意义上的知识。此外,它还具有四个特征:适应性运算能力、计算的容错能力、人脑的计算速度、与人脑一样决策与思维的正确率”^[3]。他认为从硬件上看,计算神经网络是低层次的,是由生物机理产生的模型,而人工神经网络是中等层次的模型,是由计算神经网络加知识组成的;从软件上看,CI 主要依赖生产者提供的数值材料,而不是依赖于知识,CI 是低层次的算法,它计算地推理,而传统的人工智能(Artificial Intelligence, AI)是中等层次的模型,它是计算智能加知识,而生物智能(Biological Intelligence, BI)则是指人脑中的思维。R. C. Eberhart 给出的定义是“一种包含计算的方法,它们表现出学习或者处理新情况的能力,从而使得系统具有了一种或者几种推理功能,如泛化、恢复、联想和抽象等。计算智能系统通常包括多种方法的混合,如人工神经网络、模糊系统、进化计算系统和知识元件等,计算智能系统通常设计成模仿生物智能的某些方面”^[14]。还有一些学者从外延上对计算智能进行了定义,如 Pedrycz 给出的定义是“已经认定为计算智能所包含的领域有神经网络、粒度信息和粒度计算,以及进化计算”^[15]。Fogel 给出的定义是“神经网络、模糊系统和进化系统等技术都囊括在计算智能中,这个相对较新的术语概括性地描述了适合于解决新问题并且不依赖于明晰的人类知识的计算方法”^[16]。Marks 列举出了 CI 包括的主要技术:神经网络、基因算法、模糊系统、进化计算和人工生命^[17]。

关于 CI 和 AI 之间的关系有两种观点。J. C. Bezdek 等学者认为计算智能是人工智能的子集。他们认为在智能的三个层次中,第一层是生物智能,是由人脑中物理化学过程体现的;第二层是人工智能,是人造的以符号系统为基础来处理人的知识和有关数据;第三层是计算智能,它由计算机通过数学

计算对由数值计算和传感器得到的数据进行处理。生物智能包括了人工智能,人工智能又包含了计算智能。而 R. C. Eberhart 等学者认为 CI 和 AI 属于不同的范畴,CI 与 AI 之间有重合的部分。L. A. Zadeh 将人工神经网络、进化计算和模糊逻辑归纳为“软计算”(Soft Computing, SC),和传统上精确、严格的“硬计算”(Hard Computing, HC)相区别^[18,19]。他认为计算智能在本质上属于“软计算”,因为使用计算智能中的方法对问题求解时,即便是对象模型和边界条件不精确和不完整也能够得到一个合理的解,而在人工智能中基于模型求解等传统的“硬计算”方法通常需要系统具有精确的模型参数和严格的边界条件,计算智能和人工智能的区别也在于所采用的推理类型,AI 中使用严格的逻辑和规则,而 CI 中使用模糊的逻辑和规则。Zadeh 进一步提出了机器智商(Machine Intelligence Quotient, MIQ)的概念作为测量人造系统智能的标准。CI 具有明显的数值计算信息处理的特征,而且 CI 强调用计算的方法来研究和处理智能问题。CI 包括的 6 种主要技术为:(1)粗糙计算(Rough Computing, RC)^[20,21];(2)模糊计算(Fuzzy Computing, FC)^[22];(3)神经计算(Neural Computing, NC);(4)进化计算(Evolutionary Computing, EC);(5)粒度计算(Granular Computing, GrC);(6)概率计算(Probabilistic Computing, PC)。CI 和 AI 之间有相互重叠的部分,如 CI 中的概率计算同时也属于 AI。总体上说,CI 和 AI 二者既相互补充又有区别,即: $CI \neq AI$ 。

WT 作为最主要的信息技术(Information Technology, IT),在 Internet 和无线网络上有着广泛的应用。WT 是一个混合技术,包括了如 Internet、无线网络、数据库、搜索引擎、程序设计语言、Web 软件、Agents、电子商务系统等相关技术。在众多的 WT 中,Web Agent 在 CWI 中发挥着关键作用。Agent 的概念来自于分布式人工智能领域,是人工智能中的一个术语。Agent 是存在于某一环境中的实体,能够感知环境,接受来自环境的消息,并且做出反应,进而能够反作用于环境。Agent 运行在动态的环境中,是具有高度自治能力的实体,它能够接受其它实体的委托并为之服务。Agent 具有的特性为^[23]:(1)自主性(Autonomy):Agent 有属于自身的资源和行为控制机制,可以在没有人或者其它 Agent 直接干预的情况下运作。而且根据其内部状态和感知到的环境信息,对自己的行为和内部状态有某种控制能力;(2)社交性(Sociability):Agent 和其它 Agent 通过某种交流语言进行交互,以获得协调和合作;(3)反应性(Reactivity):Agent 观察其环境,并在一定时间内做出反应,以改变环境;(4)主动性(Proactivity):Agent 不仅能够对环境做出反应,而且能够接受某些提示信息,采取主动行动,体现出面向目标的行为;(5)智能性(Intelligence):Agent 具有一定程度的智能,能够完成包括推理到自学习等一系列的智能行为。Agent 在一定程度上模拟了人类社会的行为和关系,具有一定的智能并且能够自主运行,而且能向其它的实体提供相应的服务。Agent 与其它 WT 技术的主要区别是:它具有智能和目标驱动的属性;能够通过各种社交、学习和推理等方法感知和适应复杂的动态环境;具有自动追求目标的能力。

3.3 CWI 与 WI

与 CWI 联系紧密的一个概念是 Web 智能(Web Intelligence, WI)^[24-27]。Ning Zhong、Jiming Liu、Y. Y. Yao 等人在 2000 年第 24 届国际计算机软件和应用年会(IEEE COMP-SAC)数据挖掘和 Web 信息系统分会上首先提出了 WI 的概

念。WI 目前还没有一个公认的正式定义, Ning Zhong 等人给出的定义为: WI 在 Web 和 Internet 上充分利用人工智能(AI)和高级信息技术(IT)^[26]。这个定义可以用公式表示为 $WI=AI+IT$ ^[27]。WI 的目标是 AI 和 IT 在新的 Web 平台上的联合目标, WI 将 AI 和 IT 应用到智能的 Web 信息系统(Intelligent Web Information Systems, IWIS)的设计和实现上, IWIS 实现了推理、学习和自我提高等人类智能的功能^[26]。

CWI 与 WI 之间是有区别的。首先, CWI 是研究在有线和无线网络的不确定性环境下, 使用 CI 和 WT 技术处理粗糙的、概率的、模糊的、随机的等不确定性数据, 做出正确的决策; WI 是在 Web 上采用 AI 和 IT 技术提高 Web 信息系统的智能。正如 3.2 节中对 CI 和 AI 的讨论 $CI \neq AI$, CWI 和 WI 也是不相同的, 应用 AI 可以处理具有概率性的 Web 数据, 但不能处理具有粗糙性等其它不确定性特征的 Web 数据。其次, CWI 的应用侧重于提高有线和无线网络上电子商务应用系统的智能性, 而 WI 的应用主要体现在 IWIS 的设计和实现上。

正如 CI 和 AI 之间既有区别又相互补充一样, CWI 与 WI 二者间也有联系。将 CI、AI 和 WT 相互结合是未来 CWI 的发展方向。因此, CWI 和 WI 两个领域的研究成果可以相互借鉴。

4 CWI 研究内容

作为 CI 和 WT 的混合技术, CWI 主要采用了模糊计算、神经计算、进化计算、概率计算、粒度计算、粗糙计算和智能 Agent 等技术。目前, CWI 有 7 个主要的研究领域^[1], 包括 (1) 模糊 Web 智能(Fuzzy Web Intelligence, FWI)、(2) 粒度 Web 智能(Granular Web Intelligence, GWI)、(3) 粗糙 Web 智能(Rough Web Intelligence, RWI)、(4) 神经 Web 智能(Neural Web Intelligence, NWI)、(5) 进化 Web 智能(Evolutionary Web Intelligence, EWI)、(6) 概率 Web 智能(Probabilistic Web Intelligence, PWI) 和 (7) 混合 Web 智能(Hybrid Web Intelligence, HWI)。

4.1 模糊 Web 智能

FWI 主要采用了模糊逻辑和 WT 两个技术。FWI 的主要目标是设计模糊智能 Agent 系统来处理电子商务应用中数据、信息和知识的模糊性, 有效地在电子商务应用中做出令人满意的决策。

4.2 粒度 Web 智能

GWI 主要采用了粒度计算和 WT 两个技术。GWI 的主要目标是设计粒度智能 Agent 系统来有效地处理电子商务应用中的数据粒、信息粒和知识粒。

4.3 粗糙 Web 智能

RWI 主要采用了粗糙集和 WT 两个技术。RWI 的主要目标是设计粗糙智能 Agent 系统来有效地处理电子商务应用中的数据、信息和知识的粗糙性。

4.4 神经 Web 智能

NWI 主要采用了神经网络和 WT 两个技术。NWI 的主要目标是设计神经智能 Agent 系统从数据和信息中学习知识, 智能地对电子商务应用做出敏捷的决策。

4.5 进化 Web 智能

EWI 主要采用了进化计算和 WT 两个技术。EWI 的主要目标是设计进化智能 Agent 系统来有效地优化电子商务应

用中的任务。

4.6 概率 Web 智能

PWI 主要采用了概率计算和 WT 两个技术。PWI 的主要目标是设计概率智能 Agent 系统来有效地处理电子商务应用中数据、信息和知识的概率性。

4.7 混合 Web 智能

HWI 采用了两个或者两个以上的 CI 技术和 WT 技术。HWI 的主要目标是设计混合智能 Agent 系统来有效地处理电子商务应用中数据、信息和知识存在的多个问题。例如, 模糊神经 Web 智能(Fuzzy Neural Web Intelligence, FNWI) 主要采用了模糊逻辑、神经网络和 WT 技术, 同理, HWI 还包括粒度模糊 Web 智能(Granular Fuzzy Web Intelligence, GF-WI)、粒度神经 Web 智能(Granular Neural Web Intelligence, GNWI)、粒度模糊神经 Web 智能(Granular Fuzzy Neural Web Intelligence, GFNWI) 等。

5 CWI 应用

CWI 在构建智能化的电子商务系统中有着广泛的应用, 本节用几个例子来说明 CWI 系统的设计和应用。

(1) Ronald R. Yager 设计了一种模糊智能 Agent 系统以帮助广告商制定电子商务网站上的广告显示决策^[9]。Ronald R. Yager 研究了当网站中包含有多个广告商投放的广告, 以及单个广告商投放的多个广告的情况下, 如何实现对于不同类型的访问用户显示某个适合的广告。他将模糊系统应用到了智能 Agent 框架中, 其中模糊规则的前提表示访问用户的特征, 而结论表示评价价值。Agent 系统通过电子商务网站的网页收集访问用户的特征信息, 通过模糊系统得到一个与该用户的类型相关的评价价值, 通过对评价价值的比较来决定访问用户是否是潜在的购买者, 以及应该对其显示哪种商品的广告。与传统媒体的广告方式相比, 电子商务网站可以凭借即时性信息处理的优势为不同的用户提供特定的广告, 实现目标式营销。

(2) Ponthap Rojanavas 提出了一种采用粗糙模糊集理论的 Web 搜索 Agent 系统^[28]。系统为用户分别创建了包含不同分类的用户描述文件, 在每个分类中的词为同义词, 并且各个同义词具有不同的权值。应用粗糙模糊集理论, 将词汇域定义为论域, 将用户描述文件中的分类看成是论域上的等价关系。当用户查询时, 将用户的查询条件作为参考集, 应用粗糙模糊集理论对查询条件进行细化后得到查询条件的上近似(upper approximation)和隐藏近似(hidden approximation), 然后将查询条件的上近似和隐藏近似作为新的查询条件提交给搜索引擎进行搜索。对搜索引擎返回的搜索结果 Web 页进行模糊处理, 根据 Web 页面的内容得到表示该 Web 页的向量。计算出搜索结果 Web 页与查询条件之间的相似度, 按照相似度的大小排列搜索结果 Web 页。搜索系统接到用户的反馈后, 更新用户描述文件中关键字的权值, 在分类中加入新的关键字或者删除关键字。

(3) Yan-Qing Zhang 等提出了一种个性化的模糊无线 Agent 系统(Personalized Fuzzy Wireless Agents, PFWA)^[29]。PFWA 的模块包括模糊无线搜索引擎(Fuzzy Wireless Search Engine, FWSE)、无线模糊推理引擎(Wireless Fuzzy Inference Engine, WFIE)、模糊知识库(Fuzzy Knowledge Base, FKB)、个人数据库(Personal Data Base, PDB)、模糊关系信息系统(Fuzzy Relational Information System, FRIS)和模糊决策系统

(Fuzzy Decision System, FDS)。FRIS 中使用模糊相关矩阵表示两个模糊搜索关键字之间的相似度。WFIE 使用 FKB 中的模糊规则对 FWSE 和 PDB 的输入进行推理,生成模糊推理结果。而后 FDS 通过 FRIS 中的模糊相关信息对模糊推理结果进行分析,最后的搜索结果显示在手机等移动设备上。PFWA 在实现上采用了 WAP、WML、Java Servlets、Agent 和数据库等技术,可以用于天气、交通等信息的个性化搜索。

6 CWI 展望

在 Internet 和无线网络所构成的复杂的、动态的全球性网络环境中,Web 上数据的不确定性将是一个长期的问题。CWI 面对的长期挑战是:(1)如何处理有线和无线网络上的不确定性;(2)如何从不确定的 Web 环境中发现有用的信息和知识;(3)如何制定智能的电子商务应用决策。未来在更加广泛的领域内将 CI、AI、BI 等智能技术与 WT 结合的混合 Web 智能(Hybrid Web Intelligence, HWI)将会成为 CWI 的必然发展趋势。与 CWI 相比,HWI 有更广的范围,可以在更加复杂的 Web 应用中有效地处理 Web 上数据的不确定性问题^[1]。我们认为,HWI 必将会在有线和无线网络上的电子应用系统中发挥重要的作用。

未来的 HWI 将会有大量的针对不确定性的智能化 Web 应用,其中主要的 HWI 应用包括^[2]:(1)电子商务(e-Business)、电子政务(e-Government)、电子教育(e-Education)等电子应用的智能 Web Agent 系统;(2)智能 Web 安全系统;(3)智能 Web 生物信息系统;(4)智能网格计算系统;(5)智能无线移动 Agent 系统;(6)智能 Web 专家系统;(7)智能 Web 娱乐系统;(8)智能 Web 服务;(9)Web 数据挖掘和 Web 知识发现;(10)基于大规模网络计算资源的智能分布式和并行 Web 计算系统。

结束语 作为一个新的、有着广泛应用前景的研究领域,CWI 在国际上受到越来越多的关注。CWI 的理论和应用总体上还处于起步阶段,还有很多问题需要完善和解决,例如发展新的粒度集合理论^[30]来更有效地解决 Web 上数据的不确定性问题等。我们认为随着研究的深入,CWI 必定会在未来的电子商务等 Web 应用中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- Zhang Y Q, Lin T Y. Computational Web Intelligence (CWI): Synergy of Computational Intelligence and Web Technology. <http://suez.cs.gsu.edu/~cscyz/research/wcci2002-cwi/Zhang-Lin.pdf>, 2004
- Zhang Y Q. Computational Web intelligence and granular Web intelligence for Web uncertainty. In: Proc. Granular Computing, 2005. 99~101
- Bezdek J C. What is Computational Intelligence?. In: Computational Intelligence: Imitating Life. J M Zurada, et al. eds. IEEE Press, 1994
- Bezdek J C. Computational Intelligence Defined-By Everyone!. In: Computational Intelligence: Soft Computing and Fuzzy-Neuro Integration with Applications. Kaynak O, et al. eds. Springer, 1998
- Fogel D B. Review of Computational Intelligence. In: Computational Intelligence: Imitating Life. Zurada J M, et al. eds. IEEE Press, 1994
- Palaniswami M. Computational Intelligence — A Dynamic System Perspective. IEEE Press, 1995
- Pedrycz W. Computational Intelligence: An Introduction. Computational Intelligence and Application. P. S. Szczepaniak, ed. Physica-Verlag, 1999
- Nikravesh M, Azvine B. New Directions in Enhancing the Power of the Internet. In: Proc. The 2001 BISC International Workshop on Fuzzy Logic and the Internet, 2001
- Yager R R. Targeted E-commerce Marketing Using Fuzzy Intelligent Agents. IEEE Intelligent Systems, 2000, 10: 42~45
- Zhang Y Q, Akkaladevi S, et al. Fuzzy Neural Web Agents for Stock Prediction. FLINT01, Aug. 2001
- Zhang Y Q, Hang S, et al. Granular Fuzzy Web Search Agents. FLINT01, Aug. 2001
- Takagi T, Tajima M. Proposal of a Search Engine based on Conceptual Matching of Text Notes. In: Proc. The 2001 BISC International Workshop on Fuzzy Logic and the Internet, 2001. 53~58
- Pedrycz W, Vasilakos A. Computational Intelligence in Telecommunications Networks. CRC Press, 2001
- Eberhart R C. Overview of computational intelligence. In: Proc. the 20th Annual Intl. Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1998, 3: 1125~1129
- Pedrycz W. Computational Intelligence: An Introduction. In: Computational Intelligence and Applications. P. S. Szczepaniak, ed. Physica-Verlag, 1999
- Fogel D. Review of Computational Intelligence: Imitating Life. IEEE Trans. on Neural Networks, 1995, 6: 1562~1565
- Marks R. Intelligence: Computational versus Artificial. IEEE Trans. on Neural Networks, 1993, 4: 737~739
- Zadeh L. Soft Computing and Fuzzy Logic. IEEE Software, 1994, 11(6)
- Zadeh L. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing. Communications of the ACM, 1994, 37(3)
- Pawlak Z. Rough sets. International Journal of Computer and Information Science, 1982, 11(5): 341~356
- Pawlak Z. Rough set-theoretical aspects of reasoning about data. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
- Zadeh L A. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965, 8: 338~353
- Wooldridge M, Jennings N R. Agent Theories, Architectures and Languages: A Survey[M]. In: Wooldridge and Jennings, eds. Intelligent Agents, Berlin: Springer-Verlag, 1995. 1~22
- Zhong N, Liu J, Yao Y Y, et al. Web intelligence(WI). In: Proc. the 24th IEEE Computer Society International Computer Software and Application Conference. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2000. 469~470
- Zhong N, Yao Y Y, Liu J, et al. Web Intelligence: Research and Development. LNAI 2198. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- Yao Y Y, Zhong N, Liu J, et al. Web intelligence(WI): Research challenges and trends in the new information age. WI2001 Keynote Talk, Maebashi, Japan, 2001. <http://wiconsortium.org/dfd/wi-intro-new.pdf>, 2004-02-16
- Zhong N. Towards Web intelligence. AWIC'03 Keynote Talk, Madrid, Spain, 2003. <http://wi-consortium.org/pdf/awic03-final.pdf>, 2004-02-16
- Ponthap Rojanavas. Extended Rough Fuzzy Sets for Web Search Agent. In: 25th Int Conf. Information Technology Interfaces ITI2003, 2003
- Zhang Yan-Qing, Fan Wei, et al. Fuzzy personalized wireless information agents. Fuzzy Systems, 2003. FUZZ '03. In: The 12th IEEE International Conference on Volume 2, 2003. 1152~1156
- Wang H B, Madiraju P, et al. Interval Neutrosophic Sets. International Journal of Applied Mathematics & Statistics, 2005, 3(5): 1~18