

# 专家系统发展综述

张煜东, 吴乐南, 王水花

ZHANG Yu-dong, WU Le-nan, WANG Shui-hua

东南大学 信息科学与工程学院, 南京 210096

School of Information Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

E-mail: zhangyudongnuaa@gmail.com

ZHANG Yu-dong, WU Le-nan, WANG Shui-hua. Survey on development of expert system. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(19): 43-47.

**Abstract:** To survey the development of expert system, this paper partitions expert systems as 5 stages: rule-based, frame-based, case-based, ontology-based, and web-based, on the basis of development sequence. In each stage the concept of corresponding expert system is analyzed, the typical algorithm is put forward, and some representative examples are advanced. Then, the development law is proposed, which is advised to consist of principle development law and technique development law. The principle development obeys the negation of negation law while the technique development can be seen as the interdisciplinary. In the end, the further direction of research is predicted.

**Key words:** expert system; development rule; survey; negation of the negation

**摘要:** 为了概括专家系统近期的发展, 按照发展次序, 将专家系统划分为基于规则、基于框架、基于案例、基于模型和基于网络的5个阶段。对每个阶段分析了对应的专家系统的思想, 给出典型算法, 并通过若干示例进行详述。然后总结了专家系统的发展规律, 将其分为原理突破与技术突破两大类, 原理突破服从“否定之否定”的发展规律, 技术突破本质上是与其他学科的交叉。文末预测了进一步的研究方向。

**关键词:** 专家系统; 发展规律; 综述; 否定之否定

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.19.012 文章编号: 1002-8331(2010)19-0043-05 文献标识码: A 中图分类号: TN911.73

## 1 引言

专家系统(ES)是人工智能领域最活跃和最广泛的领域之一<sup>[1]</sup>。自从1965年第一个专家系统Dendral在美国斯坦福大学问世以来, 经过40年的开发, 各种专家系统已遍布各个专业领域。目前, 专家系统得到了更广泛的应用, 并在应用开发中得到进一步发展。

调查显示, 专家系统主要应用在商业和工业领域, 约占60%。在英国的调查也显示, 24%的专家系统服务于财政部门。这表明专家系统正以信息处理的主流兴起, 代替传统的数据处理器。

按照发展阶段的不同, 可以将ES分为如下5个阶段: 基于规则的、基于框架的、基于案例的、基于模型的、基于Web的。本文对ES的发展进行了综述, 分析了每个阶段ES的特征。目的在于, 通过回顾ES的发展, 总结规律, 并对发展方向进行预测。

## 2 专家系统简介

专家系统定义为: 使用人类专家推理的计算机模型来处理现实世界中需要专家作出解释的复杂问题, 并得出与专家相同的结论<sup>[2]</sup>。简言之, 专家系统可视为“知识库”和“推理机”的结合, 如图1所示。显然, 知识库是专家的知识在计算机中的映射, 推理机是利用知识进行推理的能力在计算机中的映射, 构造专家系统的难点也在于这两个方面。为了更好地建立知识库, 兴起了“知识表示”、“知识获取”、“数据挖掘”等学科; 为了更好地建立推理机, 兴起了“机器推理”、“模糊推理”、

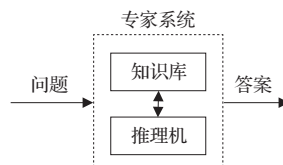


图1 简化专家系统

**基金项目:** 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60872075); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(No.706028); 江苏省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China under Grant No. BK2007103); 东南大学优秀博士学位论文基金(No.YBJJ0908)。

**作者简介:** 张煜东(1985-), 男, 哥伦比亚大学博士后, CCF 学生会会员, 研究方向: 图像识别; 吴乐南(1952-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 多媒体信息处理; 王水花(1985-), 女, 工程师, 研究方向: 人工智能。

收稿日期: 2009-11-18 修回日期: 2010-02-03

“人工神经网络”、“人工智能”等学科<sup>[3]</sup>。专家系统的发展经历了如图2所示共5个阶段<sup>[4]</sup>。下文着重介绍每个阶段的基本思想及侧重点。

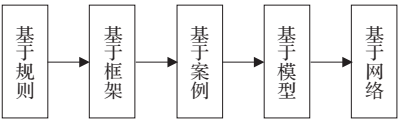


图2 专家系统的发展

3 基于规则的专家系统

3.1 专家提出规则

基于规则的专家系统是目前最常用的方式,主要归功于大量成功的实例,以及简单灵活的开发工具。它直接模仿人类的心理过程,利用一系列规则来表示专家知识。例如对动物的分类:

- (1)IF(有毛发 or 能产乳)and((有爪子 and 有利齿 and 前视)or 吃肉)and 黄褐色 and 黑色条纹, THEN 老虎
- (2)IF(有羽毛 or (能飞 and 生蛋))and 不会飞 and 游水 and 黑白色 and ?, THEN 企鹅

这里,IF 后面的语句称为前项,THEN 后面的语句称为后项。前项一般是若干事实的“与或”结合,每一个事实采用对象-属性-值(OAV)三元组表示。根据值的选择不同,可将属性分为3类。

- (1)是非属性,例如“有爪子”,该属性只能在{有、无}中二选一;
- (2)列举属性,例如“吃肉”,该属性只能在{吃草,吃肉,杂食}中选择;
- (3)数字属性,例如“触角长度3.5 cm”,“身高1.5 m”,“体重32 kg”等。

3.2 算法生成规则

上述规则是通过专家集体讨论得到的。这样形成的规则存在以下3个缺点:

- (1)需要专家提出规则,而许多情况下没有真正的专家存在;
- (2)前项限制条件较多,且规则库过于复杂。比较好的解决方法是采用中间事实。例如,首先确定哺乳动物、爬行动物、鸟类动物,然后继续进行划分;
- (3)在某些情况下,只能选取超大空间的列举属性或者数字属性,此时该属性值的选取,需要大量样本以及复杂的运算。

因此,更倾向于采用一套算法体系,能自动从数据中获得规则。决策树算法基本能够满足知识工程师的需要。较好的决策树算法包括基于信息增益的ID3、C4.5、C5 算法<sup>[5]</sup>,基于Gini索引的CART算法<sup>[6]</sup>。

4 基于框架的专家系统

基于框架的专家系统可看作是基于规则的专家系统的一种自然推广,是一种完全不同的编程风格<sup>[7]</sup>。1975年Minsky提出用“框架”来描述数据结构。框架包含某个概念的名称、知识、槽。当遇到这个概念的特定实例时,就向框架中输入这个实例的相关特定值。

编程语言中引入框架的概念后,就形成了面向对象的编程

技术。可以认为,基于框架的专家系统等于面向对象的编程技术<sup>[8]</sup>,对应的术语见表1。

表1 等价概念

基于框架的专家系统	框架	实例	陈述知识	过程知识	槽
面向对象的编程技术	类	对象	属性	事件	属性类型、约束范围等

图3显示了一个典型的图像处理识别框架,这里将整个系统分为4个大类:文档类、图像类、图像像素类、图像识别类,每类赋予特定的对象和事件,最后组合成一个系统<sup>[9]</sup>。类似地,Sorenson提出一个基于框架的关闭床边通风器的医疗决策系统<sup>[10]</sup>。Cai提出一种基于二次(two-pass)编码的帧级比特分配策略,用于低码率视频流<sup>[11]</sup>。

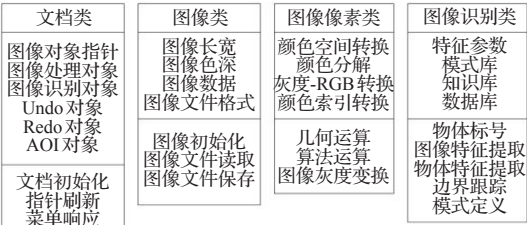


图3 图像处理识别框架

5 基于案例的专家系统

基于案例推理的专家系统,是采用以前的案例求解当前问题的技术<sup>[12]</sup>。求解过程如图4所示:首先获取当前问题信息,接着寻找最相似的以往案例。如果找到了合理的匹配,就建议使用和过去所用相同的解;如果搜索相似案例失败,则将这个案例作为新案例。因此,基于案例的专家系统能够不断学习新的经验,以增加系统求解问题的能力。例如:Liu提出一种基于案例的模糊推理技术,用于定性预测环境影响评估风险<sup>[13]</sup>。Choy提出一种基于RFID的案例管理系统,用于对流行产品开发过程中的仿照布样进行估值<sup>[14]</sup>。

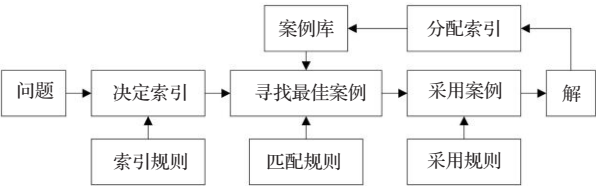


图4 基于案例的专家系统流程图

基于案例推理的专家系统的难点是,如何从案例库中寻找与当前问题条件最匹配的一个案例。最常用的匹配技术是最近邻法<sup>[15]</sup>, $k$ -近邻法<sup>[16]</sup>,径向基函数网络<sup>[17]</sup>等。然而,过大的案例库会导致系统搜索时间过长,因此,往往需要进行预处理,删去过分相似的案例。

6 基于模型的专家系统

传统的专家系统一个主要缺点在于“缺乏知识的重用性和共享性”,而采用本体论(模型)来设计专家系统,可以解决该缺点。另外,它既能增加系统功能,提高性能指标;又可独立深入研究各种模型及其相关,将结果用于系统设计<sup>[18]</sup>。

基于本体论的专家系统通过元模型清晰定义、设计原理概念化和知识库标准化3个方面来获得系统的重用性和共享

性。通过将某事物的模型、原理、知识库采用本体论的方法严格定义后,就能保证该事物与该模型严格对应,在今后的设计中,可方便地重新调用该模型以加速系统设计<sup>[19]</sup>。

图5是由6个模型搭建起来的一个小型控制系统,实现了利用神经网络逼近车间生产过程,继而预测产量。由于模型组件、接口、通信、限制等全部标准化,因此利用Simulink软件,通过简单的鼠标连线,可在1分钟内开发出这个系统。

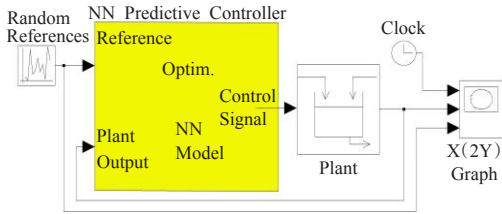


图5 基于本体论的专家系统示例

基于本体论的专家系统发展出2个新分支,一个是因果时间模型,在模型中考虑因果时间尺度;另一个是神经网络模型,用网络来实现知识的推理。

### 6.1 因果时间模型

因果性对人类理解物理系统的行为十分关键。而人类对因果的识别建立在原因和结果之间的时间延迟上。如何将实际系统中的时延关系正确映射到计算机中,本体论给出如所示表2所示的13种时间标度法。

表2 因果时间标度

直接建模	Ta1:共有从属时间标度	Ta2:从属时间标度
	Ta3:积分时间标度	Ta4:均衡时间标度
时间约束建模	Tb1:更快机制时间标度	Tb2:更慢机制时间标度
组件结构建模	Tc1:内部组件时间标度	Tc2:组件间的时间标度
	Tc3:全局时间标度	Tc4:整个系统时间标度
兴趣期间建模	Td1:初始期间时间标度	Td2:中间过渡时间标度
	Td3:最后期间时间标度	

利用这13个时间标度,可以表示现实的所有系统。例如,控制核电站<sup>[20]</sup>的热能流动。核电站通过两个散热器(IHX和AC)向露天散发反应堆容器(RX)中产生的热能。由于是测试电站,没有发电机。该系统包含两个子系统A和B,每个子系统包含主、次两个循环,分别流通散热剂和热能。

通过27个组件、143个参数、102个约束,以及基于7个时间标度的因果模型,即可建立该核电站的模型<sup>[21]</sup>,如图6所示,其中7个时间标度是系统能够实现因果推理的关键,定义见表3,满足 $T1 < T2 < T3 < T4 < T5 < T6 < T7$ 。

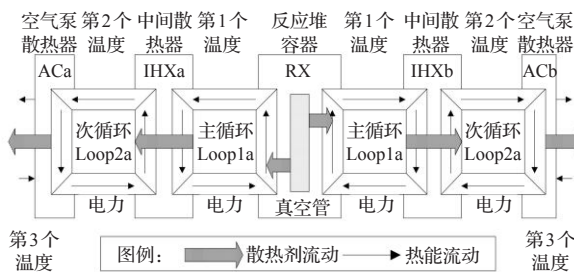


图6 核电站的热传递模型图

### 6.2 神经网络模型

神经网络模型与传统的产生式专家系统存在本质区别,首先知识表示从显式变为隐式<sup>[22]</sup>;其次,知识不是通过人的加

表3 核电站推理系统的时间标度

时间标度	物理意义	定义
T1	组件内部	Ta1/2 & Tb1/2 & Tc1
T2	全局同时发生	Ta1/2 & Tb1 & Tc3
T3	组件之间	Ta1/2 & Tb2 & Tc2
T4	全局	Ta1/2 & Tb2 & Tc3
T5	积分	Ta3 & Tb2 & Tc3
T6	局部均衡	Ta4 & Tb2 & Tc3
T7	完全均衡	Ta4 & Tb2 & Tc4

工,而是通过算子自动获取<sup>[23]</sup>;最后,推理机制不是传统的归纳推理,而是变为在竞争层对权值的竞争<sup>[24]</sup>。

与传统的产生式专家系统相比,神经网络有以下6点优势<sup>[25]</sup>:(1)固有并行性;(2)分布式联想存储;(3)较好容错性;(4)自适应能力;(5)通过实例学习能力;(6)便于硬件实现。值得注意的是,神经网络也存在下述5个缺点:(1)对解决小规模问题有优势;(2)性能受样本集影响;(3)没有解释能力;(4)没有询问机制;(5)对知识、输入证据、输出结果等要求数字化。

因此,目前的研究方向在于,将神经网络与专家系统集成,使其优势互补。集成系统的结构如图7所示。根据侧重点不同,集成分成以下3种模式<sup>[26]</sup>:(1)神经网络支持专家系统;(2)专家系统支持神经网络;(3)协同式的神经网络专家系统。

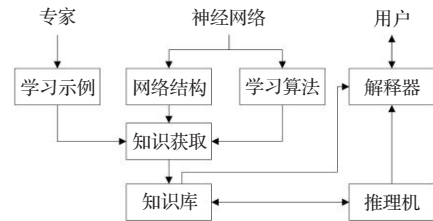


图7 神经网络专家系统的集成图

### 7 基于Web的专家系统

随着Internet的发展,Web已成为用户的交互接口,软件也逐步走向网络化。而专家系统的发展也顺应该趋势,将人机交互定位在Internet层次:专家、工程师与用户通过浏览器访问专家系统服务器,将问题传递给服务器;服务器则通过后台的推理机,调用本地或远程的数据库、知识库来推导结论,并将这些结论反馈给用户。

Delen<sup>[27]</sup>提出一种基于Web的电影票房预测系统,采用神经网络、决策树、Logistic回归、判别分析4种模型进行协同预测,最后采用线性模型实现信息融合。Li<sup>[28]</sup>利用300条规则、400幅图像库,构建了一个判别鱼类病症的Web专家系统,可以判别9种淡水鱼的126类病症。

图8给出了基于Web的专家系统的结构,一般将其分为3个层次:浏览器层、应用逻辑层、数据库层,这种划分方式符合3层网络结构<sup>[29]</sup>。

### 8 发展规律

从上述发展总结专家系统的发展规律,主要可分为“原理上的突破”与“技术上的突破”两大类。

#### 8.1 原理发展

由基于规则的专家系统,发展到基于案例的专家系统,再



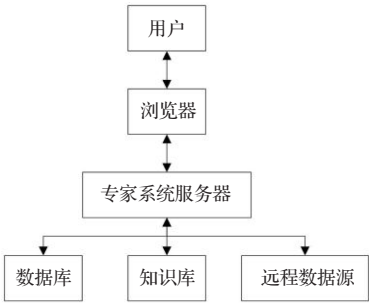


图8 基于Web专家系统结构图

发展到最近的基于神经网络模型的专家系统,其发展规律示于表4。

表4 原理发展规律

专家系统	知识表达	推理策略
基于规则	经过萃取的知识(加工)	IF-THEN(简单神经元反射)
基于案例	未经分析的案例(未加工)	距离-权值(线性机制)
基于神经网络模型	网络权值(简单加工)	竞争(非线性神经网络)

可见,在知识表达层面,传统的基于规则的方式可视作经过萃取的知识;随后,人们认识到直接提取知识不仅花费大量时间,而且容易受到专家本身的不精确性影响,因此,直接将一个个成功案例记录在专家系统中,但这种未经分析的案例一般容量较大,且存在信息冗余;最后,发展为通过神经网络权值来表达的模型,网络权值可视作对知识的简单加工,反映了知识本身,但是不直接<sup>[30]</sup>。

其次,在推理策略上,传统基于规则的方式采用IF-THEN方式,等价于神经元的反射机制(给神经元一个刺激,神经元就会做出相应的反射);随后,在基于案例的方式中,推理策略发展成为距离-权值策略,即通过计算案例库中案例与给定问题的距离,计算过往案例在新问题中的权值,这种方法等价于一种线性机制;最后,在基于神经网络模型的专家系统中,推理策略再次回归到非线性神经元方式,此时与最开始的神元反射机制不同,不是模仿神经元的最简单的反射机制,而是模仿神经元的深层网络层次<sup>[31]</sup>。

可见,专家系统在“知识表达”与“推理策略”上的发展,均符合“否定之否定(Negation of the negation)”<sup>[32]</sup>的哲学发展规律。

8.2 技术发展

专家系统在技术上的发展,可视作与别的学科的交叉。表5给出了与专家系统在技术上发展上对应的交叉学科,可见,这3种专家系统的发展阶段,本质上可视作与其余3类交叉学科的融合。

表5 技术发展规律

专家系统	交叉学科
基于框架	面向对象的编程
基于因果	因果本体论
基于网络	计算机网络技术

9 专家系统的发展方向

专家系统的远期目标是探究人类智能和机器智能的基本原理,研究用自动机模拟人类的思维过程和智能行为。该目标远远超出计算机科学的范畴,几乎涉及自然科学和社会科学的所有学科。因此,目前对专家系统的发展预测集中在近

期目标,即建造能用于代替人类高级脑力劳动的专家系统。新型的专家系统应具有如图9所示的特征。完全实现这些特征是一项艰巨的任务,目前第一、二种新特征已经较为成熟。

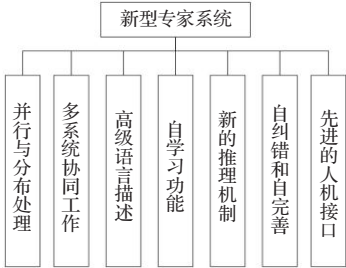


图9 新型专家系统特征

分布式专家系统具有分布处理的特征,其主要目的在于把一个专家系统的功能分解到多个处理器上并行工作,从而在总体上提高系统的处理效率;协同式专家系统综合若干个子专家系统,互相协作共同解决一个问题。尽管分布式专家系统与协同式专家系统存在共性,例如都涉及到多个子系统,但是前者强调处理和知识的分布,后者强调子系统间的协同合作。因此,协同式专家系统并不一定要求多个处理器,甚至在同一个处理器上实现亦可<sup>[33]</sup>。

10 结论

随着人工智能应用方法的日渐成熟,专家系统的应用领域也不断扩大。有人类活动的地方,必将有智能技术包括专家系统的应用。专家系统将成为21世纪人类进行智能管理与决策的工具与助手。

参考文献:

[1] 蔡自兴, Durkin J, 龚涛. 高级专家系统: 原理、设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[2] Liao S H. Expert system methodologies and applications—A decade review from 1995 to 2004[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(1): 93-103.

[3] Prasad R, Ranjan K R, Sinha A K. AMRAPALIKA: An expert system for the diagnosis of pests, diseases, and disorders in Indian mango[J]. Knowledge-Based Systems, 2006, 19(1): 9-21.

[4] Lyu J J, Chen M N. Automated visual inspection expert system for multivariate statistical process control chart[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 5113-5118.

[5] Wang Y D, Lim E P, Hwang S Y. Efficient mining of group patterns from user movement data[J]. Data & Knowledge Engineering, 2006, 57(3): 240-282.

[6] Zheng H F, Chen L D, Han X Z, et al. Classification and regression tree (CART) for analysis of soybean yield variability among fields in Northeast China: The importance of phosphorus application rates under drought conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(1): 98-105.

[7] Shiue W, Li S T, Chen K J. A frame knowledge system for managing financial decision knowledge[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1068-1079.

[8] Dibuz S. A frame-based approach to conformance testing[J]. Microprocessing and Microprogramming, 1993, 39(2): 191-194.

[9] 刘相滨, 王卫星. 一个通用的图像处理与识别系统框架[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(33): 118-150.

[10] Sorenson D, Grissom C K, Carpenter L, et al. A frame-based

- representation for a bedside ventilator weaning protocol[J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2008, 41(3): 461-468.
- [11] Cai J F, He Z H, Chen C W. A novel frame-level bit allocation based on two-pass video encoding for low bit rate video streaming applications[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2006, 17(4): 783-798.
- [12] Neves L P, Dias L C, Antunes C H, et al. Structuring an MC-DA model using SSM: A case study in energy efficiency[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 199(3): 834-845.
- [13] Liu K F R, Yu C W. Integrating case-based and fuzzy reasoning to qualitatively predict risk in an environmental impact assessment review[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(10): 1241-1251.
- [14] Choy K L, Chow K H, Moon K L, et al. A RFID-case-based sample management system for fashion product development[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(6): 882-896.
- [15] Jahromi M Z, Parvinnia E, John R. A method of learning weighted similarity function to improve the performance of nearest neighbor[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(17): 2964-2973.
- [16] Medina J L V, Boque R, Ferre J. Bagged  $k$ -nearest neighbours classification with uncertainty in the variables[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 646(1): 62-68.
- [17] Preseren P P, Stopar B. GPS orbit approximation using radial basis function networks[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(7): 1389-1396.
- [18] Chou J S. Generalized linear model-based expert system for estimating the cost of transportation projects[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 4253-4267.
- [19] Liao S H, Chen J L, Hsu T Y. Ontology-based data mining approach implemented for sport marketing[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(8): 11045-11056.
- [20] Jou Y T, Lin C J, Yenn T C, et al. The implementation of a human factors engineering checklist for human system interfaces upgrade in nuclear power plants[J]. *Safety Science*, 2009, 47(7): 1016-1025.
- [21] Chuang Y H, Yoon W C, Min D. A model-based framework for the analysis of team communication in nuclear power plants[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(6): 1030-1040.
- [22] 张煜东, 吴乐南, 韦耿. 基于粒子群神经网络的细胞图像分割方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(7): 56-62.
- [23] 张煜东, 吴乐南, 韦耿. 神经网络泛化增强技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(17): 4997-5002.
- [24] 张煜东, 吴乐南, 吴含前. 工程优化问题中神经网络与进化算法的比较[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(3): 1-6.
- [25] Zhang Y D, Wu L N, Wei G. A New classifier for Polarimetric SAR images[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 94: 83-104.
- [26] Amodio P, Pellegrini A, Ubiali E, et al. The EEG assessment of low-grade hepatic encephalopathy: Comparison of an artificial neural network-expert system (ANNES) based evaluation with visual EEG readings and EEG spectral analysis[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2006, 117(10): 2243-2251.
- [27] Delen D, Sharda R, Kumar P. Movie forecast Guru: A Web-based DSS for Hollywood managers[J]. *Decision Support Systems*, 2007, 43: 1151-1170.
- [28] Li D L, Fu Z, Duan Y Q. Fish-Expert: a web-based expert system for fish disease diagnosis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2002, 23(3): 311-320.
- [29] 张煜东, 吴乐南, 奚吉, 等. 进化计算研究现状(上)[J]. *电脑开发与应用*, 2009, 22(12): 1-5.
- [30] 张煜东, 吴乐南, 韦耿, 等. 最大模糊互信息用于图像分割[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(20): 1-5.
- [31] 张煜东, 吴乐南, 王水花, 等. 一种基于时延PCNN的最短路径算法用于火灾救援调度[J]. *物流技术*, 2009, 28(12): 120-122.
- [32] Glassman M. Negation through history: dialectics and human development[J]. *New Ideas in Psychology*, 2000, 18(1): 1-22.
- [33] 张煜东, 吴乐南, 王水花, 等. 一种基于神经网络的遥感图像压缩编码[J]. *南京信息工程大学学报*, 2009, 1(1): 82-88.

(上接42页)

神经网络学习算法, 并将其有效地应用于图像特征绑定问题。理论分析表明, 所提出算法与CLMNN网络的动力学方程是等价的。仿真实验证明, 该算法较原始算法具有更强的抗噪声能力、更快的收敛速度, 以及更为合理的特征绑定结果。下一步的研究重点是增强算法的自适应学习能力, 特别是结合有监督学习方法或者Hebbian学习规则设计更为合理的相容度矩阵计算方法。关于这一点, 文献[4]已做了初步的尝试。

## 参考文献:

- [1] Ritter H. A spatial approach to feature linking[C]//Proceedings of International Conference on Neural Networks, Paris, 1990.
- [2] Yi Z, Tan K K. Multistability of discrete-time recurrent neural networks with unsaturating piecewise linear activation functions[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(2): 329-336.
- [3] Yi Z, Tan K K. Multistability analysis for recurrent neural networks with unsaturating piecewise linear transfer functions[J]. *Neural Computation*, 2003, 15: 639-662.
- [4] Weng S, Wersing H, Steil J J, et al. Learning lateral interactions for feature binding and sensory segmentation from prototypic basis interactions[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, 17(4): 843-862.
- [5] Ontrup J, Wersing H, Ritter H. A computational feature binding model of human texture perception[J]. *Cognitive Processing*, 2004, 5(1): 31-44.
- [6] Wersing H, Kirstein S, Schneiders B, et al. Online learning for bootstrapping of object recognition and localization in a biologically motivated architecture[C]//Proceedings of International Conference on Computer Vision Systems, Santorini, Greece, 2008.
- [7] Wu F Y. The Potts model[J]. *Review of Modern Physics*, 1983, 54: 235.
- [8] Sirosh J, Miikkulainen R. Topographic receptive fields and patterned lateral interaction in a self-organizing model of the primary visual cortex[J]. *Neural Computation*, 1997, 9: 577-594.
- [9] Hofmann T, Puzicha J, Buhmann J. Unsupervised texture segmentation in a deterministic annealing framework[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 803-818.
- [10] Koseki O, Matsubara F. Cluster heat bath method on a Quasi-One-Dimensional Ising model[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1997, 66(2): 322-325.