

# 模糊情感分析及其在 E-learning 系统中的应用<sup>\*</sup>

解迎刚<sup>1</sup> 王志良<sup>1</sup> 平安<sup>1</sup> 永井正武<sup>2</sup>

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)<sup>1</sup> (日本帝京大学科学工程学院情报学科)<sup>2</sup>

**摘要** 基于模糊数学,本文提出了用模糊数学的评价集方法对学习者的综合评价,是模糊模式识别的一种新的扩展和应用,为拟人化和情感识别提供了一种新的研究思路。同时本文设计了一个具有情绪反应的智能 Agent 助理。根据以上提出的模糊情感识别,我们将模糊情感识别的结果应用于 E-learning 系统,从而实现了教学系统的人性化和智能化。

**关键词** 模糊情感识别, E-learning 系统, 情感计算, 拟人化教学

## Intelligent E-learning System Based on Fuzzy Emotion Recognition Model

XIE Ying-Gang WANG Zhi-Liang PING An Masatake Nagai

(School of Information Engineering, University of Science & Technology, Beijing 100083)<sup>1</sup>

**Abstract** Based on fuzzy mathematics, a novel fuzzy emotion recognition model is presented. The model is a new application field to fuzzy pattern recognition, the E-Learning system is implemented based on the fuzzy emotion recognition model and intelligent assistant agent. Moreover, intelligent assistant agent emotion's production and reaction are discussed in the paper. This fuzzy emotion recognition model and intelligent assistant agent designed in this system intensifies the intelligence of the whole system.

**Keywords** Fuzzy emotion recognition, E-learning system, Intelligent agent, Affective computing

### 1 引言

随着计算机技术的迅速发展和网络的普及,电子教室教学、远程教学、多媒体教学等利用现代化技术的教育形式越来越受到人们的关注,并且在外国经过多年的发展已经得到广泛的应用,人们更加注重人性化和智能化的教学方式。同时,脑科学的研究成果表明,情感在人类学习中起着十分重要的作用<sup>[1]</sup>,情绪对学习有很大的影响。而智能 Agent 助理(Intelligent agents)正是实现人性化和智能化的一个重要手段和方法,因此在 E-learning 系统中使用智能 Agent 助理有着十分重大和现实的意义。

对于学习者学习过程的综合评价,由于涉及到学习者当前情感状态等具有不确定性的因素,本文采用模糊评价的方法。该方法是基于模糊数学建立的,是模糊模式识别在拟人化和情感识别应用上一种新的思路。

学习支持(Learning supports)在传统教学情境中非常重要,而在 E-learning 学习情境中,因学习者处于各自不同的时间和空间中,学习支持就显得更加重要。从这个角度讲,智能 Agent 助理技术无疑是一种最佳的学习支持工具,它实质上代表了一种更加智能化的服务,实现了更加人性化的交互手段,使得 E-learning 系统环境具有更好的交互性和智能性,内容的表现形式更加丰富、更具有吸引力,能够有力地提高学习者的学习兴趣和学习效率<sup>[3]</sup>。

### 2 系统介绍

本文的核心是用模糊数学的评价集方法对学习者的综合

合评价,同时设计一个智能 Agent 助理,用于人机交互,在教学过程中根据学生的学习状态生成它的情绪和反应,对学习者的教学辅助策略做出实时调整,达到智能化和人性化助理教学的目的。

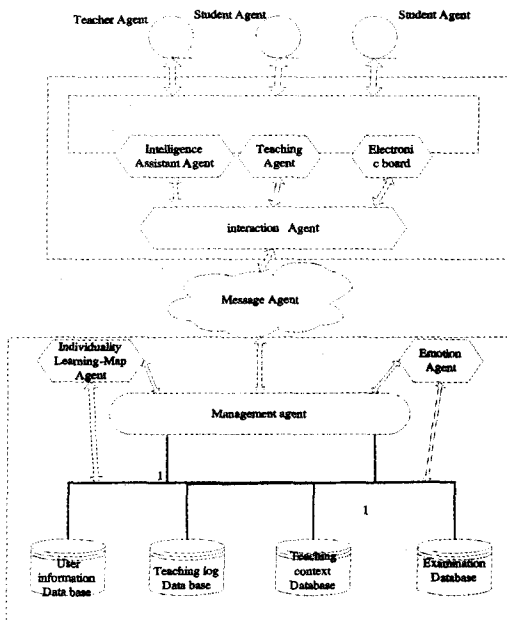


图 1 E-learning 系统结构图

整个 E-learning 系统采用 B/S 系统结构,利用 mobile Agent 实现消息的传递。分布在网络空间中的 Agents 包括:学

<sup>\*</sup> 本课题得到以下基金支持:北京市“现代信息科学与网络技术”重点实验室开放基金项目——“多模人机交互技术中的情感计算方法研究”(基金项目编号为 TDXX0503);北京科技大学重点基金项目——NBIC 会聚技术研究;国家自然科学基金资助项目基于状态空间描述的人工情绪理论和方法研究——基金号:60573059。解迎刚 博士生,主要课题研究方向:人工心理、Agent 技术及应用。

生 Agent、教师 Agent (由管理 Agent 派生)、个性化 Learning-Map Agent、白板 Agent、通信 Agent、情感分析 Agent、教学 Agent、中介 Agent 以及智能 Agent 助理等,这些 Agent 实体由管理 Agent 动态维护。

在系统中智能 Agent 助理通过动态地跟踪学习者的学习状态、行为、情绪变化等特征,形成自己的情绪,它会影响对学习者的教学辅助策略,并进行智能化反应,与学习者进行进一步的沟通,体现出人性化和智能化的教学特点。

### 3 系统的情绪生成和反应

为了使系统可以判断、表现情绪,表现出人性化、智能化的特点,我们建立了情绪系统。该情绪系统分成两个情绪模块:第一个模块会根据外界输入产生不同强度的情绪;而第二个模块则会依据不同强度的情绪来产生对应的行为反应。它的行为反应决定于 3 个因素:情绪的类型、情绪的强度以及外界的环境。这样,依据该情绪系统,智能 Agent 助理会动态地针对学习者的各项学习行为产生不同的情绪,而不同的情绪将会影响情绪化智能 Agent 助理对学习者的学习辅助策略。

#### 3.1 情绪模块的建立

情绪是对外界刺激比较强烈的心理反应,广义是指人对客观事物的态度体验,狭义指有机体受到生活环境中的刺激时生理需要是否获得满足而产生暂时性的、较剧烈的态度及其体验。有愉快、悲哀、愤怒、恐惧、忧愁、赞同等不同形态,它是人对客观世界的一种反映形式,产生根源在于客观现实本身<sup>[1]</sup>。

本系统定义了 4 种基本情绪:兴奋、高兴、犹豫、不高兴,并且建立了相应的情绪空间。本系统是以模糊逻辑为基础来模拟智能 Agent 助理情绪的,模糊逻辑模块可以模拟情绪中所具有的不确定性。此模块会将内在、外在的状态以及从外界环境中所感知到的信息加以处理,生成情绪和反应<sup>[2]</sup>。

这里先给出情绪系统结构图,如图 2 所示。

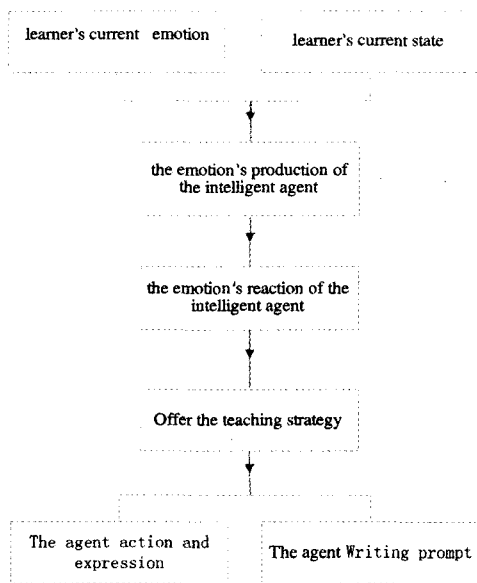


图 2 智能 Agent 助理的情绪系统结构图

#### 3.2 模糊情感识别

对一个事物的评价常常要涉及多个因素或者多个指标,这时就要根据这多个因素对事物做综合评价。对于学习者的综合评价和本系统情绪的产生也是如此。综合评价的具体过程是:将评价目标看成是由多种因素组成的模糊集合(称为因

素集  $U$ ),再设定这些因素所能选取的评审等级,组成评语的模糊集合(称为评判集  $V$ ),分别求出各单一因素对各个评审等级的归属程度(称为模糊矩阵),然后根据各个因素在评价目标中的权重分配,通过计算(称为模糊矩阵合成)求出评价的定量解值<sup>[5,6]</sup>。

这些情绪的产生是以学习者的行为状态和对学习者情感的判断产生的。在系统中我们主要通过在线时间评价、在线次数、同 Agent 交互次数、浏览其他内容时间和次数、学习内容评价、课程相对进度、以往单元测试情况、学习者当前的情绪等作为情绪生成的要素。为了简化说明,在这里我们仅取三类值作为我们判断和生成情绪的依据来进行说明和描述,分别是:在线时间评价价值、学习内容评价价值、学习者当前的情绪评价价值。

(1) 在线时间评价价值:

$$T_i = \begin{cases} T_{i-1} + \frac{CT_i}{ST_i}, & 1 > T_i >= 0 \\ 1, & T_i >= 1 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 学习内容评价价值:

$$S_i = \begin{cases} S_{i-1} * SW + IS + AS + \frac{TS}{SD_i}, & 100 > S_i >= 0 \\ 100, & S_i >= 100 \end{cases} \quad (2)$$

这里,  $SW$ : 评价价值累加过程中相对权重,取  $SW=0.9$ ;

$IS$ : 学习中同 Agent 交互次数;

$AS$ : Agent 奖罚分;

$TS$ : 单元测试得分(五分制);

$SD_i$ : 单元测试难易度(0.8~1.2, 难度越大,数字越小)。

(3) 学习者当前的情绪评价价值:

由于情绪是一种多成分、多维度、多种类、多水平整合的复合心理过程,因此任何基本情绪定义和维度空间的定义都是有局限性的<sup>[2]</sup>。现阶段我们仅简单选取基于情感状态空间检测的情绪判断值  $P_i$  作为学习者当前情绪的评价价值。

最后我们定义如下变量表达式来描述情绪生成:

$$P = F(e_1, e_2, e_3) \quad (3)$$

$e_1, e_2, e_3$  分别为在线时间评价价值、学习内容评价价值、学习者当前的情绪评价价值,  $F$  为系统内外界刺激到系统情绪的生成原则。  $P$  为外部刺激得到的内部情绪状态。由于在 E-learning 系统中,在线时间评价价值、学习内容评价价值、学习者当前的情绪评价价值在系统的情绪生成中权重是不同的,因此将上述三个情绪生成的基本元素作归一化处理。这里我们采用模糊综合评判法,首先确定评价指标集  $U$  和评判集  $V$ ,建立  $U \times V$  的模糊评判矩阵  $R$ ;设置指标权重  $M$ , 尔后对矩阵合成得  $A$ , 并对  $A$  做归一化处理<sup>[7]</sup>。

因为在系统中我们主要考虑三个因素:在线时间评价价值、学习内容评价价值、学习者当前的情绪评价价值,它们可构成因素集  $e = \{ \text{在线时间评价价值}(e_1), \text{学习内容评价价值}(e_2), \text{学习者当前的情绪评价价值}(e_3) \}$ , 并定义评判集为  $v = \{ \text{很用功}(v_1), \text{一般}(v_2), \text{不用功}(v_3) \}$ , 则对  $e_i (i=1, 2, 3)$  的判断为  $\{e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}\}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

设对于学习者的某一状态  $T_i=0.5, S_i=50, Pfe=0.76$ 。对于学习内容评价价值( $e_2$ ),我们给的评价为:很用功( $e_{21}$ )0.3,一般( $e_{22}$ )0.5,不用功( $e_{23}$ )0.2,则对  $e_2$  的评价为(0.3, 0.5, 0.2)。此外假定  $e_1$  的评价为(0.3, 0.7, 0),  $e_3$  的评价为(0.4, 0.6, 0),于是可得出单因素评价的模糊矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

系统情绪生成的三个因素在评价中的地位不是均等的,需给予不同权数。设在线时间评价值权数为 0.1、学习内容评价值权数为 0.3、学习者当前的情绪评价值权数为 0.6,这三个权数便组成  $e$  上的一个模糊向量  $A = (0.1, 0.3, 0.6)$ 。通过  $A$  和  $R$  的合成可得情绪生成综合评价值:

$$\begin{aligned} B &= A * R \\ &= (0.1, 0.3, 0.6) * \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.36, 0.58, 0.06) \end{aligned} \quad (6)$$

因为  $0.36 + 0.58 + 0.06 = 1$ , 所以不需要进一步归一化。如最后的结果  $P_1 + P_2 + P_3 = P$  不等于 1, 则用  $E$  去除各数, 便是归一化后的综合评价结果。归一化后的评价结果我们记为:

$$P = (P_1, P_2, P_3) \quad (7)$$

在实际的系统中, 我们根据刺激值不同给出相应的评判集, 表 1 中列出了系统部分的评价集。根据三个刺激因素(在线时间评价值、学习内容评价值、学习者当前的情绪评价值)的不同情况得到相应的评价集, 然后经过上述归一化处理后, 即可得出系统情绪状态值。

表 1 系统部分评价集合

T	相应的评价集	S	相应的评价集	P	相应的评价集
1	(1,0,0)	100	(1,0,0)	1	(1,0,0)
...	.....	...	.....	...	.....
0.8	(0.6,0.4,0)	80	(0.5,0.4,0.1)	0.5	(0.4,0.6,0)
0.5	(0.3,0.6,0.1)	50	(0.2,0.5,0.3)	0	(0.1,0.8,0.1)
...	.....	...	.....	...	.....
0	(0,0.8,0.2)	0	(0,0.3,0.7)	-1	(0,0,1)

### 3.3 智能 Agent 助理的情绪反应

为了达到更和谐的人机交互, 系统应根据模糊评价的结果, 生产不同的情绪反应, 同时依据情绪反应提供相应的学习辅助策略, 使得学习者能更好地融入课程的学习之中。

首先我们定义系统情绪值对情绪决策影响的规则, 如下所示:

一个规划可以描述为下面四元组:

$Pi_i := (\text{Object}, \text{Page}, \text{Action}, \text{Emotion})$

- Object: 引发该规划的事件;
- Page: 智能 Agent 助理的情绪表达(即上面定义的多位向量);
- Action: 表示一组完成该规划需要采取的行为;
- Emotion: 表示该规则反应出来的情绪。

情绪的反应是由一组基本动作序列组成的, 所以我们定义为 Behave,  $\text{Behave}_i := \Phi(\text{Action}_i, i=0, 1, \dots)$ 。其中  $\Phi$  是一种复合函数, 表示了动作的组合。这里我们将精灵现有的基本动作定义为原子动作, 则相关动作可以通过原子动作的组合递归定义如下:

① Agent 的所有动作定义为原子动作, 记为  $\text{Action}_i, (i=0, 1, \dots)$ 。

② 如果  $\text{Action}_1, \text{Action}_2$  是动作, 则  $\text{Action}_1 \wedge \text{Action}_2$  是动作,  $\wedge$  表示连接, 即  $\text{Action}_2$  在  $\text{Action}_1$  完成后执行。

③ 如果  $\text{Action}_1, \text{Action}_2$  是动作, 则  $\text{Action}_1 \vee \text{Action}_2$  是动作,  $\vee$  表示并行, 即  $\text{Action}_1$  和  $\text{Action}_2$  两个分支过程中选择其中一个执行即可。

④ 如果  $\text{Action}_1, \text{Action}_2, \text{Action}_3$  是动作, 则  $(\text{Action}_1 \vee \text{Action}_2) * \text{Action}_3$  是动作, 其中  $*$  表示非等待连接, 即  $\text{Action}_1$  和  $\text{Action}_2$  中有任何一个动作完成即可执行  $\text{Action}_3$ 。

同时定义规则库, 用于产生相应的行为规则。规则形如:  $\text{IF} [\text{conditions}] \text{ THEN} [\text{rules}]$

• 条件相当于前述的 Object, Page, State, 基于智能 Agent 助理对环境的判断感知。

• 在规划行为库中所有的规则最后, 设计一个条件一直为真的规划。一般是为了维护智能 Agent 助理持续性, 并使其随机采取一些行为。

对于具体规则和相对应的行为, 在系统中我们定义了知识库进行存贮, 在这里我们仅作简单说明。

表 2 具体规则和相对应的行为

emotion	conditions and rules (the scope of $P_i$ )	the action of the intelligent agent
excited	$P_1: (0.8 \sim 1)$ $P_2: (0 \sim 0.2)$ $P_3: (0)$	Greeting, Congratulate Hearing_1
happy	$P_1: (0.5 \sim 1)$ $P_2: (0 \sim 0.4)$ $P_3: (0 \sim 0.1)$	GetTechy, GetArtsy GetAttention
hesitate	$P_1: (0 \sim 0.2)$ $P_2: (0 \sim 0.7)$ $P_3: (0 \sim 0.2)$	Explain, Searching, Wave
sullen	$P_1: (0 \sim 0.1)$ $P_2: (0 \sim 0.3)$ $P_3: (0.3 \sim 1)$	Thinking CheckingSomething, LookUp

根据表 2, 则前面归一化例子中得到的  $P = (0.36 \ 0.58 \ 0.06)$  即表现为高兴的情绪。在真实的系统中, 对于不同环境下不同的情景, 即 Object, Page, State 不同情况, 我们均定义了相应的规则和动作。

## 4 智能 Agent 助理设计

智能 Agent 助理的一般定义为: 它是一套工具软件, 能依据使用者的需求, 在网际网络上自动地完成某些工作, 同时具有个性化、自主性、目标导向、连续执行及可调适的特性。

在本系统中, 智能 Agent 助理体现了和谐人机交互的理念。人机交互就是根据用户模型给用户提供的行动引导和操作条件, 设法减少用户的知觉、注意、记忆、思维、理解、表达、交流、发现问题和解决问题等心理过程的劳动负荷, 提高人机界面的可用性, 减少操作出错, 减少面向机器行为的学习负荷。科学研究表明: 从人机工程的角度考虑, 赋予电脑或程序更多人性化色彩, 如支持语音合成输出信息、语音识别输入指令、智能提示、动画等, 能够充分提高人机交互的有效性和易用性<sup>[4]</sup>。

在本系统中, 智能 Agent 助理是以作为教学协助的卡通形象展现出来的。考虑到学习者的习惯, 我们使用大家都比较熟悉的孙悟空形象作为交互精灵。本文所使用的智能 Agent 助理是利用了现在流行的 windows com 组件 Microsoft

Agent 来实现的。Microsoft Agent 是一组可编程的软件服务,在具体的应用中可以以交互式动画角色(动画精灵)出现,实质是一种 ActiveX 控件。在系统中可以利用这些精灵作为交互助手来完成介绍、引导、娱乐或者其它提高界面交互的行为。在该 acs 文件中提供多达 48 个基本动作,我们可以利用这些动作的组合完成各种情绪的表现。

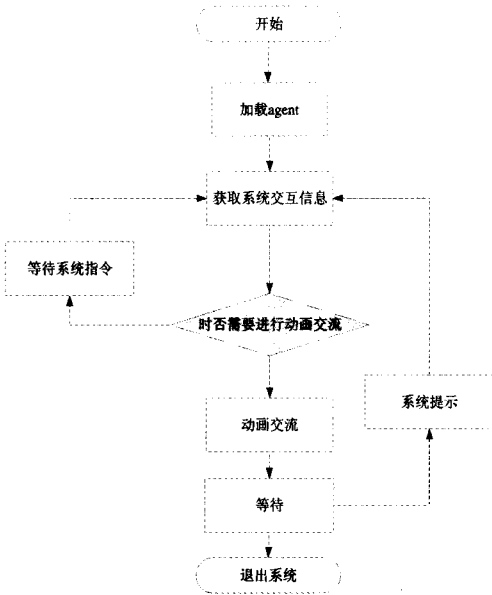


图 3 Agent 动画显示模块流程

Agent 动画显示模块负责用 Agent 动画人物动态显示学习者的情感信息和文字、声音等,辅助教师通过智能 Agent 助理和学习者进行人性化的情感互动和交流。

### 5 系统实现

本系统的实现采用了 Agent 技术、Aglet 技术、JAVA 编程和 JSP 技术,数据库采用了 MS SQL Server 2000。在教学过程中,首先由学生通过人机接口申请学习登录,生成学生 Agent。系统得到学生的相关信息后,由位于服务器端的管理 Agent 进行学生信息分析,随后对学生学习状态、学习情绪、学习日志的分析等进行综合评价,并派遣智能 Agent 助理到学生端,由它根据初始评价值生成情绪和反应(初始的情绪和反应相对于初始评价值更加积极),在教学过程中根据学生学习情况作出实时调整,进行智能化、人性化助理教学。

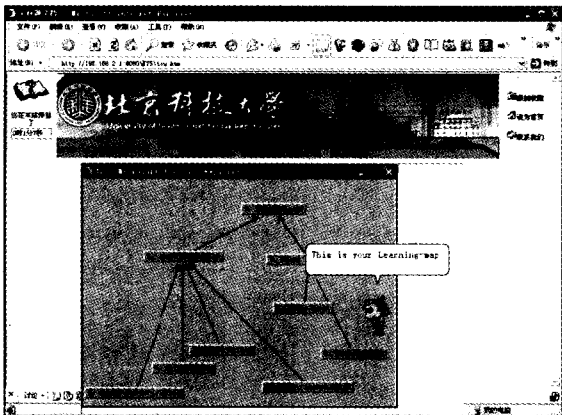


图 4 Agent 助理情绪反应(一)

系统中,智能 Agent 助理的智能化、人性化主要通过提示功能来体现。提示功能分为两种类型:其一为智能 Agent 助理人物主动提示,另一种则是学习者手动要求智能 Agent 助理给予提示。

当学习者进入到课程之后,系统会不停地自动侦测,并且在适当的时候给予学习者提示。当学习者学习环境或状态出现以下情况时,智能 Agent 助理自动进行提示(仅列举出三种情况给予说明)。

#### (1) 课程新学习者导航提示

当学习者是课程的新学习者时(进入课程次数少于 3 次时),智能 Agent 助理会提示并询问学习者是否要为他介绍课程的架构、learning 及学习方法。

#### (2) 学习者疑惑提示

当学习者在某一节课程内容停留的时间超过了已定义的阈值时,认为学习者在这一节的学习中遇到了问题。例如(进入课程时间多于 20min 而没有进入下一环节),智能 Agent 助理会主动询问学习者是否有疑问或需要帮助。

#### (3) 学习者不认真,智能 Agent 助理生气了

课程学习中,根据学习者当前的情绪评价价值,发现学习者处于厌恶学习的状态,甚至多次离开位置(可以通过学习者当前的情绪评价价值判断)。经过 2 次提示后,智能 Agent 助理生气了,提出警告,并采取扣分、批评等策略和相应动作以引起学习者重视。

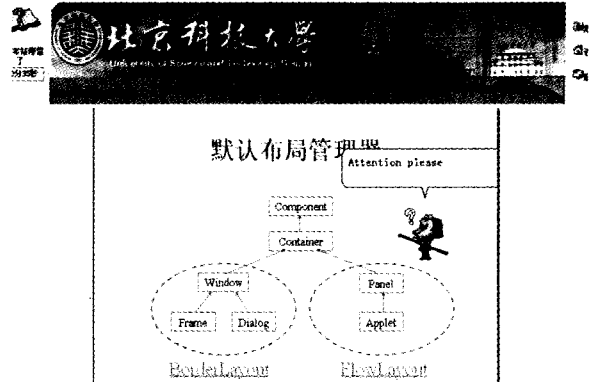


图 5 Agent 助理情绪反应(二)

此外学习者可以主动要求智能 Agent 助理给予提示,在系统中表现为当学习者以鼠标的左键连续点选智能 Agent 助理两次时,智能 Agent 助理会出现提示(仅列举出两种情况给予说明)。

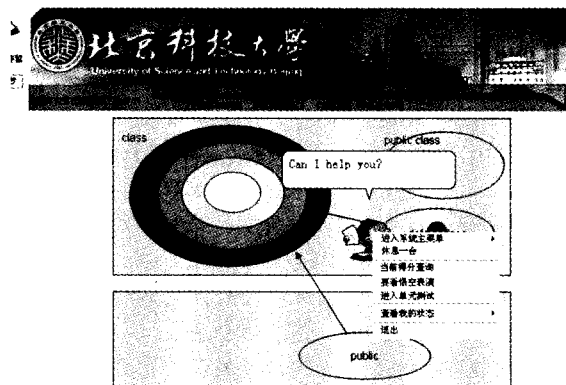


图 6 Agent 助理情绪反应(三)

(1) 要求暂停学习

学习者学习累了,要求暂时休息或要求智能 Agent 助理随机地表演一些动作,智能 Agent 助理会根据学习者要求采取相应行为,这样学习过程的中断就不会受到惩罚。

(2) 要求智能 Agent 助理给予帮助

当学习者在学习过程中或答题过程中出现疑问,需要智能 Agent 助理给予帮助的时候,学习者可要求智能 Agent 助理给予提示或其他帮助。

**结论** 本文提出了用模糊数学的评价集方法对学习者的综合评价,同时设计一个智能 Agent 助理用于人机交互,并将模糊情感识别的结果应用于本系统,在教学过程中根据学生的学习状态生成它的情绪和反应,对学习者的教学辅助策略做出实时调整,达到智能化和人性化助理教学的目的。今后,我们将在此基础上将进行更深入的研究,在系统中改进语音识别,视觉跟踪等技术,使其智能化和个性化有更加突出的表现。

参 考 文 献

1 Wang Zhiliang. Artificial Psychology-a Most Accessible Science Research to Human Brain. Journal of University of Science and Technology Beijing,2000,22(5)

2 Xie Yinggang, Wang Zhiliang, Zhang Qin. Humanized clothing recommendation system based on Intelligent Agent. In: the ICS-CA'2006 Conference, Chongqing, 2006,5  
 3 Ahn H, Picard R W. Affective-cognitive Learning and Decision Making: A Motivational Reward Framework For Affective Agents. In: First International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, 2005. 866~873  
 4 Wu Jianhui, Luo Yuejia. The Approaches to Study of Cognitive Science on Emotion. In: The 1th Chinese Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction,2003(12):6~11  
 5 Huang Hui. Fuzzy Set Theory and Its Application. Journal of Zhongnan University of Finance and Economics, CNKI: ISSN: 1003-5230. 0. 1987-01-012  
 6 Zhang Xiao, Shen Qian. E-Business Based on Fuzzy Theory and PROLOG. Journal of Tianjin University of Commerce. 2000-06-006  
 7 Feng Jian, Yao Min. Personalized Internet Service Application Based on Fuzzy Theory. Computer Applications and Software, 2004-07-033  
 8 Dai Jiahao. A Fuzzy Similarity Measure-based Decision Model to Assist Shopping in the Electronic Store. Taiwan, Fengjia University, 2002

(上接第 154 页)

$\text{hold}(s_1, o, *, a, s), \text{hold}(s_2, o, *, a, s_1), \dots, \text{hold}(s', o, *, a, s_n)$  都在  $G$  中。

**命题 1** 设  $\Pi$  是一个良定义的可代理授权程序,  $A$  是其授权解集, 则  $A$  是代理正确的。

**证明:** 我们根据代理正确性定义来证明。从规则 (C5) 和 (C6) 我们很容易推出条件 (a) 成立。为证明条件 (b), 只需证明  $\langle_{o,a}$  在  $A$  中是一个严格偏序。为此, 我们定义另一个关系  $\langle'_{o,a}$  如下: 设  $M$  是  $\Pi$  对应的解集, 则  $s \langle'_{o,a} s'$ ; 如果存在授权  $\text{grant1}(s', o, *, a, s) \in M$  或存在某主体  $s''$  使得  $s \langle'_{o,a} s''$  且  $s'' \langle'_{o,a} s'$ , 根据一般规则 (D2), 不难看出  $\langle'_{o,a}$  是一个严格偏序。既然  $\langle_{o,a}$  是  $\langle'_{o,a}$  的子集 (hold 从  $\text{grant1}$  导出), 说明  $\langle_{o,a}$  也是一个严格偏序。

**命题 2** 设  $\Pi$  是一个良定义的可代理授权程序,  $A$  是它的一个解集, 对任何主体集  $S$  上的关于  $A$  的代理关系  $\langle_{o,a}$ , 设  $S' = \{s \mid \exists s' (s, s' \in S \wedge (s \langle_{o,a} s' \vee s' \langle_{o,a} s))\}$ , 则管理者  $\#$  是  $S'$  中关于  $\langle_{o,a}$  的最小主体。

**注意,** 设有一个偏序集  $(C, \leq)$ ,  $c \in C$ , 如果对  $\forall c' \in C$  都有  $c \leq c'$ , 则  $c$  是偏序集  $(C, \leq)$  中的最小元素。  $S'$  中含有  $S$  中所有关于  $\langle_{o,a}$  可比较的主体。

**证明:** 首先注意任何有限非空偏序集  $(Z, \leq)$  有一个较小元素, 设  $s \in S'$  是关于  $\langle_{o,a}$  的一个较小元素, 既然  $s$  是可比较的, 则存在  $s' \in S'$ , 使得  $s \langle_{o,a} s'$ 。不失一般性, 设  $s \langle_{o,a} s'$  不是由传递推出, 既然我们总可以找到这样一个  $s'$ , 所以  $\text{hold}(s', o, *, a, s)$  为真。根据规则 (C5) 和 (C6),  $s = \#$  或对某  $s'' \in S'$ ,  $\text{hold}(s, o, *, a, s'')$  为真。第 2 个条件意味着  $s'' \langle_{o,a} s$ , 说明  $s$  不是较小, 矛盾, 所以可得出  $s = \#$ 。既然  $S'$  中的所有主体都是关于  $\langle_{o,a}$  可比较的且  $\#$  是惟一一个较小主体, 所以  $\#$  是  $S'$  中关于  $\langle_{o,a}$  的最小元素。

这个命题表示, 如果一个主体  $s$  关于  $\langle_{o,a}$  可比较于另一

个主体  $s'$ , 则意味着  $s$  是  $s'$  的代理或  $s'$  是  $s$  的代理, 则  $\# \langle_{o,a} s$ , 因此所有的授权都是从  $\#$  开始传递出来的。

**结束语** 有几个研究课题值得进一步探讨。首先我们考虑要扩展现有模型, 使其能处理动态主体、客体和存取权限的分层关系。其次我们将开发考虑动态优先关系的冲突解决方法, 用来支持建立在主体、客体及存取权限的不同性质上的不同的策略。最后我们希望实现一个基于逻辑程序设计的我们所提方法的原型。

参 考 文 献

1 Abadi M, Burrows M, Lampson B, et al. A calculus for access control in distributed systems. ACM Trans on programming languages and systems, 1993, 15(4):706~734  
 2 Bertino E, buccafurri F, Ferrari E, et al. A logical framework for reasoning on data access control policies. In: Proceedings of the 12th IEEE Computer Society Foundations Workshop, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1999. 175~189  
 3 Crampton J, Loizou G, O'Shea G. A logic of access control. The Computer Journal, 2001, 44:54~66  
 4 Gelfond M, Lifschitz V. Classical negation in logic programs and disjunctive databases. New Generation Computing, 1991, 9:365~385  
 5 Jajodia S, Samarati P, Subrahmanian V S. A logical language for expressing authorizations. In: Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Security and Privacy, IEEE Computer Society Press, 1997. 31~42  
 6 Ruan C, Varadarajan V. Resolving conflicts in authorization delegations. In: Proceedings of the 7th Australasian Conference on Information Security and Privacy, 2002  
 7 Woo T, Lam S. Authorization in distributed systems: a formal approach. In: Proceedings of IEEE on Research in Security and Privacy, 1992. 33~50