

基于 2 型模糊描述逻辑的知识描述与推理及其在信任管理系统中的应用^{*})

孙小林 卢正鼎 李瑞轩 文坤梅 李玉华 王治刚
(华中科技大学计算机科学与技术学院 武汉 430074)

摘要 描述逻辑由于其强大的描述能力与成熟的推理算法而被广泛应用。然而,经典描述逻辑局限于处理确定的概念和关系,从而导致描述逻辑很难处理类似语义网等大型本体系统中的模糊知识。虽然 1 型模糊集可以一定程度上减轻不确定性带来的影响,但是其采用确定的隶属度值来决定模糊度的方法是不够精准的。与之相比,基于 2 型模糊集的系统能够利用隶属度区间更加精确地描述模糊信息。本文给出描述逻辑 ALC 的 2 型模糊扩展形式,并且给出并分析了 2 型模糊 ALB 的描述和推理方法。最后使用 2 型模糊 ALB 建立了一个基于模糊本体的信任管理系统 F-OntoTM。

关键词 2 型模糊集,描述逻辑,知识描述,信任管理系统

Representation and Reasoning in Trust Management System with a Type-2 Fuzzy Description Logic

SUN Xiao-Lin LU Zheng-Ding LI Rui-Xuan WEN Kun-Mei LI Yu-Hua WANG Zhi-Gang
(Internet and Distributed Computing Lab, College of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Description Logics have been widely applied for its strong abilities of description and mature algorithms in reasoning. However, classical Description Logics are limited in dealing with the crisp concepts and roles, which makes it difficult to analyze imprecise information in Semantic Web or other ontology systems. To some extent, type-1 fuzzy sets can reduce the effect of uncertainties. But it is still not enough. Comparing with type-1 fuzzy theory, system based on type-2 fuzzy sets can describe imprecise knowledge more exactly by using membership degree interval. We present a type-2 fuzzy version of ALB and show the representation and reasoning capabilities of type-2 fuzzy ALB in this paper. Then we use the membership degree interval that is proposed by type-2 fuzzy sets to build the fuzzy ontology system named F-OntoTM for trust management.

Keywords Type-2 fuzzy set, Description logics, Knowledge representation, Trust management system

1 引言

如今不仅资源的概念被广泛应用到许多领域,各个领域可以获得的资源数量也呈爆炸性的增长。语义网 SW (Semantic Web)^[1,2]就是以资源为基础的一个重要应用,其主要目的之一就是让计算机可以理解并处理网络中的数据信息,目前普遍拟采用本体技术来实现这一目标。本体可以以统一的格式来表述知识,提高各种系统之间的协同工作能力,这就可以促进世界范围内的知识共享。

本体技术在许多应用(如 SW)中扮演了非常重要的角色,许多企业或研究机构都建立了基于各种各样领域本体的系统。作为本体的一种逻辑支撑,描述逻辑 DLs (Description Logics)^[3]通过定义应用域相关的概念(术语)并运用这些概念描述该应用域中个体的特性与个体之间的关系(断言)。随着近几年本体的快速发展,DLs 的应用也变得越来越普遍。作为知识表示 KR (Knowledge Representation) 形式中的一种,强大的知识描述能力使 DLs 在不同的应用域中可以比较容易地表述信息^[4]。W3C 在 2004 年推荐基于描述逻辑的本体建模语言 OWL 作为 Semantic Web Ontology 的标准建模语言。从此,OWL 语言逐渐被应用到各个领域,DLs 也相应得到了更广泛的应用空间。同样,基于 DLs 的本体技术也可以应用到信任管理模型的建立中。

1996 年, M. Blaze 等人首先提出了信任管理的概念^[6],并在此基础上发展出了相应的信任管理系统 PolicyMaker 和 KeyNote^[7]。文[8]将信任分为直接信任和推荐信任,以对实体完成任务的期望为基础,根据肯定经验和否定经验计算出实体能够完成任务的概率,以次概率作为实体信任度的度量,并给出了信任推导和综合的规则以及相应的信任度计算方法。

然而,经典 DLs 只能定义确定的概念和属性,并且由此进行的确定推理只能返回“true”和“false”。这样的推理结果显然无法解决真实世界里本体系统中的模糊问题。SW 中的一些应用例,如语义文档检索,经常需要查找并管理不确定信息。但是经典 DLs 中的确定概念和属性限制了它们描述模糊知识的能力,这些经典 DLs 的特性随即导致了 OWL 描述和处理模糊信息的困难。这说明,如果 OWL 没有进行模糊扩展,将很难适应一些需要处理模糊信息的应用领域。因此,用于支持更广泛的本体系统的 DLs 的模糊扩展——模糊 DLs 应运而生。我们利用模糊本体在以上提及的不同的信任方式下实现了 F-OntoTM 的知识描述。

目前许多模糊逻辑系统都是基于 1 型模糊集,该理论由 Zadeh 于 1965 年提出,从此被广泛应用,并成为人工智能领域中的一个热点。虽然 1 型模糊集的研究和应用涉及许多领域,例如数据挖掘、决策分析等,但是最近才被应用到 DLs。

^{*})国家自然科学基金项目(No. 60403027)。孙小林 博士生,主要从事数据挖掘、本体论与语义网等方面的研究。

Meghini 提出了一种没有考虑推理算法的、初步的模糊 DL, 用作多媒体文档检索的建模工具^[10]。Straccia 在 2001 年提出了 ALC 的 1 型模糊集, 扩展模糊 FALC 逻辑。不久, Straccia 又将作为标准本体语言 OWL 的逻辑支撑 $\mathcal{SBLN}(\mathcal{Q})$ 逻辑扩展为 1 型模糊 DL。然而, 由于 1 型模糊集的限制, \mathcal{FALC} 以及模糊 $\mathcal{SBLN}(\mathcal{Q})$ 都很难清晰地表述复杂的模糊知识。

本文第 2 节将简单介绍 DL、1 型模糊 ALC 等基础概念; 第 3 节为描述逻辑 ALC 的一种 2 型模糊逻辑扩展提供了语法及语义支持, 扩展 OW 来描述并推理模糊知识; 第 4 节给出 2 型模糊 ALC 在模糊信任管理系统 F-OntoTM 中的应用, 并分析其模糊本体的 OWL 代码; 最后给出结论以及对深入研究的展望。

2 基础概念

2.1 描述逻辑 DLs

除了我们上面提到的特性外, DLs 能够利用子概念(父概念)关系(包容关系)在给定的术语集中将概念层次结构化, 所以术语集常被构建成包容关系的层次结构树。这样的层次结构为不同的概念之间建立联系提供了极大的便利。除此之外, 这样的机制还可以一定程度上提高推理服务的效率。

一个基于 DLs 的知识表示系统可以很方便地构建知识库, 并对其内容进行推理等操作。DLs 的知识库由两个部分组成: 术语集(TBox)和断言集(ABox)。TBox 描述了公理、术语等应用域所需要的词汇表。相反, ABox 包含根据词汇表定义的命名实例, 以及描述实例之间二元关系的角色关系的声明断言^[3]。一个完整的 DLs 系统除了需要存储公理和断言外, 还需要提供关于它们的推理服务, 如定义各种推理规则等, 这里就不赘述了。

2.2 经典 \mathcal{ALC}

\mathcal{ALC} 中的概念和关系定义如下: \mathcal{A} 代表原子概念集合; \mathcal{C} 表示由公理给出的复杂概念集合; \mathcal{R} 表示关系集合。我们有: (1) $A, B \in \mathcal{A}$ (2) $C, D \in \mathcal{C}$ and (3) $R \in \mathcal{R}$ 。我们可以将 TBox 中的概念的定义归纳成以下两种格式: $C \sqsubseteq_{\beta} (A, B, R, \sqcap, \sqcup, \forall, \exists, \perp, \top)$ (局部定义) 以及 $C \equiv_{\beta} (A, B, R, \sqcap, \sqcup, \forall, \exists, \perp, \top)$ (完整定义)。其中 \perp 和 \top 是两种特殊的原子概念, 我们称之为“底层概念”与“通用概念”, 对应集合中的“空集”与“全集”。文[4]中给出了 \mathcal{ALC} 构造子的语法与语义。

2.3 1 型模糊 \mathcal{ALC}

就像我们在第 1 节里提到的, 经典 DLs(例如 \mathcal{ALC}) 无法处理不确定的知识表达与推理, 例如某个概念只能在一定程度上被某条公理描述。为了解决这个问题, Straccia 提出了 \mathcal{ALC} 的模糊扩展逻辑 \mathcal{FALC} , 来使 \mathcal{ALC} 支持模糊概念的描述。由于 Straccia 使用某个确定数值来定义模糊概念和实例的隶属度, 我们称之为 1 型 \mathcal{FALC} 。

与经典 \mathcal{ALC} 一样, 我们定义 A, C 与 R 作为原子概念, 复杂概念与角色关系的集合。很明显, $C \sqcap D, C \sqcup D, \neg C, \forall R.C$ 以及 $\exists R.C$ 都是模糊概念。 \mathcal{FALC} 中的模糊映射 $I = (\Delta^I, \cdot^I)$, 其中 \cdot^I 是一个从模糊概念和角色到隶属度值的映射: $C^I = \Delta^I \rightarrow [0, 1]$ 与 $R^I = \Delta^I \times \Delta^I \rightarrow [0, 1]$ 。 \mathcal{FALC} 中的映射 \cdot^I 必须满足以下等式:

对于任意实例 $d \in \Delta^I$, 有

$$\top^I(d) = 1$$

$$\perp^I(d) = 0$$

$$(C \sqcap D)^I(d) = \min \{C^I(d), D^I(d)\}$$

$$(C \sqcup D)^I(d) = \max \{C^I(d), D^I(d)\}$$

$$\neg C^I(d) = 1 - C^I(d)$$

$$(\forall R.C)^I(d) = \inf_{d' \in \Delta^I} \max \{1 - R^I(d, d'), C^I(d')\}$$

$$(\exists R.C)^I(d) = \sup_{d' \in \Delta^I} \min \{R^I(d, d'), C^I(d')\}$$

\mathcal{FALC} 中最重要的部分是使用隶属度值来描述模糊概念和实例。然而, 使用确定数值来描述隶属度具有许多限制。实际上, 在现实中用一个确定的数值来处理模糊问题是非常困难(几乎是不可能)的。因此, 我们将采用更加符合实际情况的 2 型模糊集来扩展 \mathcal{ALC} 。

3 2 型模糊 \mathcal{ALC}

为了更好地处理现实世界的模糊问题, Zadeh 在 1965 年提出 1 型模糊集, 10 年后提出了 2 型模糊集(区间值模糊集)。上面已经初步提到了 2 型模糊集的一些特征, 接下来我们将详细讨论这些特点以及 2 型模糊 \mathcal{ALC} 知识表示和推理的方法。

3.1 2 型模糊集

与 1 型模糊集不同的是, 2 型模糊集使用隶属度区间来表示模糊度。其中隶属度区间为一个包含于 $[0, 1]$ 中的开区间, 其含义为隶属度将在该区间中取值。如隶属度区间 $[0.3, 0.8]$ 意味着隶属度值大小将在 0.3 与 0.8 之间。2 型模糊集使用隶属度 $\overline{\mu_A}$ 来代替 1 型模糊集中的 μ_A , 其表达式如下:

$$\overline{\mu_A}(x) = [\mu_A^L(x), \mu_A^U(x)] \quad (1)$$

式(1)中有: $\mu_A^L(x), \mu_A^U(x) : U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, \mu_A^L(x) \leq \mu_A^U(x)$ 。由(1)式可得下限函数 $\mu_A^L(x)$ 与上限函数 $\mu_A^U(x)$, 可以完全确定一个区间值模糊集 A , 其中 x 表示论域 U 的一个实例。当 2 型模糊集的上限值与下限值相等的时候, 可以将 2 型模糊集转化成 1 型模糊集, 因此可以认为 1 型模糊集是 2 型模糊集的一种特殊形式。

3.2 模糊集的三角模运算

在模糊集论中, 模糊集的运算只能用其隶属函数来确定, 而不同定义的运算会产生出不同的结果。因此建立模糊集的各种不同运算可以适应不同的模糊现象。模运算是模糊集运算的最一般形式。

映射 T 称为三角模, 如果满足条件:

$$\textcircled{1} T(0, 0) = 0, T(1, 1) = 1$$

$$\textcircled{2} a \leq c, b \leq d \Rightarrow T(a, b) \leq T(c, d)$$

$$\textcircled{3} T(a, b) = T(b, a)$$

$$\textcircled{4} T(T(a, b), c) = T(a, T(b, c))$$

当三角模满足 $T(a, 1) = a (a \in [0, 1])$, 称为 T 模; 当三角模满足 $T(0, a) = a (a \in [0, 1])$, 称为 S 模。以下是常用的 T 模和 S 模:

$$T'_0(a, b) = \begin{cases} a, (b=1) \\ b, (a=1) \\ 0, (\text{Others}) \end{cases}$$

$$S'_0(a, b) = \begin{cases} a, (b=0) \\ b, (a=0) \\ 1, (\text{Others}) \end{cases}$$

$$T_0(a, b) = a \wedge b = \min(a, b),$$

$$S_0(a, b) = a \vee b = \max(a, b)$$

$$T_1(a, b) = a \cdot b, S_1(a, b) = a + b - a \cdot b$$

$$T_2(a, b) = \frac{a \cdot b}{1 + (1-a)(1-b)},$$

$$S_2(a, b) = \frac{a+b}{1+a \cdot b}$$

$$T^\lambda(a, b) = \frac{a \cdot b}{\lambda + (1-\lambda)(a+b-ab)},$$

$$S^{\lambda}(a, b) = \frac{a+b+(\lambda-2)ab}{1+(\lambda-1)ab}, (\lambda \geq 0)$$

$$T^{\tau}(a, b) = 1 - \min(1, (1-a)^{\tau} + (1-b)^{\tau})^{1/\tau},$$

$$S^{\tau}(a, b) = \min(1, (a^{\tau} + b^{\tau})^{1/\tau}), (\tau \geq 1)$$

$$T_{\infty}(a, b) = \max(0, a+b-1),$$

$$S_{\infty}(a, b) = \min(1, a+b)$$

为了进行不确定值的运算,我们需要将这样成对的 T 模和 S 模应用到我们的模糊系统中。其中每对模之间也有强弱之分,其关系如下:

$$T'_0 \leq T_{\infty} \leq T_2 \leq T_1 \leq T_0 \leq S_0 \leq S_1 \leq S_2 \leq S_{\infty} \leq S'_0$$

直接验证即可证明。

3.3 2型模糊 \mathcal{ALC} 中的不确定性术语集

与经典 DLs 一样,2型模糊 \mathcal{ALC} 的知识库也是由两个部分组成:不确定性术语集 (TBox) 以及模糊隶属断言集 (ABox)。建立一个 DL 系统,首先必须创建 TBox 并使用基本符号来定义原子概念和角色。原子概念可以分为两种:命名符号 N_T 出现在一些公理等式的左边;而基础符号 B_T 只能出现在公理的右边。需要注意的是,原子概念是不允许被重复定义的。此外,每个原子概念都可以展开成仅仅是由 B_T 和构造子组成的描述格式。因此,可以认为基础符号及其含义在 DL 系统中是肯定存在的,即存在的概率为 1。相反,命名符号就存在不确定性。换句话说,命名符号的定义公式的成立性在 2型模糊 \mathcal{ALC} 的 TBox 中并不确定,仅仅是在某个可能性范围内成立。

例如给定 2 个名为“Animal”和“FlyingObject”的基础符号,则可以以 TBox 中公理(2)的形式定义原子概念“Bird”:

$$\text{Bird} \equiv \text{Animal} \sqcap \text{FlyingObject} \quad (2)$$

然而,现实生活中我们无法用公理(2)来确定概念“Bird”的定义,例如企鹅“penguin”无法用(2)准确定义。假如鸟是一种会飞的动物的概率在区间 $[0.9, 0.95]$ 间,我们则可以将经典 \mathcal{ALC} 中 TBox 的公理(2)转换成如下 2型模糊 \mathcal{ALC} 的格式:

$$\text{Bird}_{[0.9, 0.95]} \equiv \text{Animal} \sqcap \text{FlyingObject} \quad (3)$$

(3)式的含义是:在该 DL 系统中,“Bird”能够被概念“Animal”和“FlyingObject”交集描述的概率在 0.90 与 0.95 之间。

由于基础符号的确定性,原子概念“Animal”和“FlyingObject”在该 DL 系统中成立的可能性都为 1,即区间 $[1, 1]$ 。简单起见,凡是区间 $[1, 1]$ 的概念我们在书写的时候可以省略掉其隶属度区间。

2型模糊 \mathcal{ALC} 使用两种属性 $Lprob, Uprob$, 来描述原子概念中包含的模糊信息,其中 $0 \leq prob \leq Uprob \leq 1$ 。无论在不同的应用域环境还是不同的本体格式支持下,该方法都能使经典 DL 扩充为 2型模糊 DL 时的工作得到一定的简化。

如果定义 TBox 的时候不能确定 $Lprob, Uprob$ 的值,则可以根据该原子概念的描述来计算隶属度。例如,考虑到原子概念之间的独立性,公理(4)采用对偶模 (T_1, S_1) 计算隶属度,利用基础符号定义原子概念“Meat-eatingBird”:

$$\text{Meat-eatingBird} \equiv \text{Bird}_{[0.9, 0.95]} \sqcap \text{Meat-eatingObject} \quad (4)$$

$Lprob(Uprob)$ 的值可以根据以下等式计算得到: $\mu^L(\text{Meat-eatingBird}) = T_1(\mu^L(\text{Bird}), \mu^L(\text{Meat-eatingObject}))$ 。如果将上文得到的值 $\mu^L(\text{Bird}) = 0.9, \mu^L(\text{Meat-eatingObject}) = 1$ 代入,则有 $\mu^L(\text{Meat-eatingBird}) = 0.9 \times 1 = 0.9$ 。由此可得,原子概念“Meat-eatingBird”的隶属度区间为 $[0.9, 0.95]$ 。这种计算方法被称作 2型模糊 \mathcal{ALC} 的传递规则。

然而,该方法将会使 TBox 的展开结果产生异义,而在经

典 DLs 中不会出现这样的结果,例如

$$\text{Meat-eatingBird} \equiv \text{Bird} \sqcap \text{Meat-eatingObject} \quad (5)$$

经典 DLs 中(5)与(6)有着相同的含义:

$$\text{Meat-eatingBird} \equiv \text{Animal} \sqcap \text{FlyingObject} \sqcap \text{Meat-eatingObject} \quad (6)$$

但是在 2型模糊 \mathcal{ALC} 中,以上两式通过传递规则计算得到的隶属度明显不同,所以无法在 2型模糊 \mathcal{ALC} 的 TBox 中无条件进行展开。为了解决该问题,要求 2型模糊 \mathcal{ALC} 在提供原子概念隶属度区间时应用以下规则:如果 TBox 指定了原子概念的隶属度,则不根据传递规则计算隶属度值;否则隶属度由多个传递计算结果合并为最终隶属度。(5),(6)式的隶属度区间分别为 $[0.9, 0.95]$ 与 $[1, 1]$, 则模糊原子概念“Meat-eatingBird”最终隶属度区间应为 $[0.9, 0.95] \cap [1, 1] = [0.9, 0.95]$ 。

3.4 2型模糊 \mathcal{ALC} 中的模糊实例隶属断言集

不确定性不仅仅存在于 TBox, 在 ABox 中也一样存在模糊问题。断言: $\text{Bird}_{[0.9, 0.95]}(\text{penguin})_{[0.65, 0.9]}$ 意味着在当前 DL 系统术语集的限制下, penguin 能够被认为是模糊概念 $\text{Bird}_{[0.9, 0.95]}$ 的实例的可能性在 $[0.65, 0.90]$ 之间。与 \mathcal{FALC} 相似, ABox 中断言的格式为: $C^I(d) = [a, b]$, 其中 $0 \leq a \leq b \leq 1$ 。

以模糊概念 $\text{Bird}_{[0.9, 0.95]}$ 为例,断言 $\text{Bird}(\text{penguin})$ 如果成立,必须满足以下两个条件:

- (1) 概念 Bird 必须在 TBox 中是可满足的。
- (2) ABox 中的实例 penguin 必须属于概念 Bird。

如果采用 (T_1, S_1) 模,可以得到:

$$\mu^L(\text{Bird}(\text{penguin})) = \mu^L(\text{Bird}) \times \mu^L(\text{penguin} \in \text{Bird}) = (0.65 \times 0.90) = 0.585$$

(同理可得 $\mu^U(\text{Bird}(\text{penguin}))$)

因此,模糊成员隶属断言集 ABox 可以表示为如下等式的集合:

$$C_{[a, b]}(a) = [c, d] \quad (\text{其中 } C = f(A, B, R, \sqcap, \sqcup, \forall, \exists, \perp, \top))$$

如: $\text{Bird}_{[0.9, 0.95]}(\text{penguin}) = [0.65, 0.95]$ 或简写成 $\text{Bird}_{[0.9, 0.95]}(\text{penguin})_{[0.65, 0.98]}$ 。

3.5 2型模糊 \mathcal{ALC} 的语法及语义

2型模糊 \mathcal{ALC} 构造字的语法及语义见表 1。

表 1 2型模糊 \mathcal{ALC} 构造字的语法及语义

Constructor	Syntax	Semantics
Top(Universe)	\top	Δ^I
Bottom(Nothing)	\perp	Φ
Atomic Concept	$A[a, b]$	$A_{[a, b]}^I \subseteq \Delta^I$
Atomic Role	$R[a, b]$	$R_{[a, b]}^I \subseteq \Delta^I \times \Delta^I$
Conjunction	$C_{[a, b]} \sqcap D_{[c, d]}$	$(C \sqcap D)_{[T(a, c), T(b, d)]}^I$
Disjunction	$C_{[a, b]} \sqcup D_{[c, d]}$	$(C \sqcup D)_{[S(a, c), S(b, d)]}^I$
Negation	$\neg C_{[a, b]}$	$C_{[1-b, 1-a]}^I$
Value restriction	$\forall R_{[a, b]} \cdot C_{[c, d]}$	$\forall y. S(R_{[1-b, 1-a]}(x, y), C_{[c, d]}(y))$
Full existential quantification	$\exists R_{[a, b]} \cdot C_{[c, d]}$	$\exists y. T(R_{[a, b]}(x, y), C_{[c, d]}(y))$

定义 \mathcal{A}, \mathcal{C} 与 \mathcal{R} 为原子模糊概念、复杂模糊概念以及模糊角色关系集合,可得出 $C \sqcap D, C \sqcup D, \neg C, \forall R. C$ 和 $\exists R. C$ 是模糊概念。2型模糊 \mathcal{ALC} 中的映射关系可以表示为 $I = (\Delta^I, \cdot^I)$, 其中 \cdot^I 是将模糊概念和关系映射到隶属度区间的映射函数: $C^I = \Delta^I \rightarrow [a, b]$ 与 $R^I = \Delta^I \times \Delta^I \rightarrow [a, b]$, 其中 $a,$

b 满足 $0 \leq a \leq b \leq 1$ 。2 型模糊 \mathcal{ALC} 的映射 \cdot^1 必须满足以下等式:

$$\begin{aligned} & \text{对于任意实例 } d \in \Delta^I, \text{ 有} \\ & \top^1(d) = [1, 1] \\ & \perp^1(d) = [0, 0] \\ & C^1(d) = [\mu^L(C(d)), \mu^U(C(d))] \\ & (C \cap D)^1(d) = [T \{ \mu^L(C(d)), \mu^L(D(d)) \}, T \{ \mu^U(C(d)), \mu^U(D(d)) \}] \\ & (C \cup D)^1(d) = [S \{ \mu^L(C(d)), \mu^L(D(d)) \}, S \{ \mu^U(C(d)), \mu^U(D(d)) \}] \\ & \neg C^1(d) = [1 - \mu^U(C(d)), 1 - \mu^L(C(d))] \\ & (\forall R.C)^1(d) = \inf_{d' \in \Delta^I} [S \{ 1 - \mu^U(R(d, d')), \mu^L(C(d')) \}, S \{ 1 - \mu^L(R(d, d')), \mu^U(C(d')) \}] \\ & (\exists R.C)^1(d) = \sup_{d' \in \Delta^I} [T \{ \mu^L(R(d, d')), \mu^L(C(d')) \}, T \{ \mu^U(R(d, d')), \mu^U(C(d')) \}] \end{aligned}$$

表 1 给出了 2 型模糊 \mathcal{ALC} 的语法及语义。与 \mathcal{FALC} 不同的是, 2 型模糊 \mathcal{ALC} 中 ΔI 不再是 $[0, 1]$ 区间内数值的集合, 而是形如 $[a, b]$ 这样区间的集合, 其中 $0 \leq a \leq b \leq 1$ 。

3.6 2 型模糊 \mathcal{ALC} 的实现——2 型模糊 OWL

由于 SW 中的知识存放在本体库中, 所以本体语言就显得极其重要。由国际万维网联盟 W3C 发布的网络本体语言 OWL 可以认为是本体语言的一个里程碑, 它已经经过了广泛的讨论并得到比较一致的认可。OWL 语言是由三个字语言组成的: OWL Lite, OWL DL, OWL Full。作为一种名为 SHOIN (D+) 的 DL 的实现载体, OWL DL 被应用到许多领域, 用来描述知识库的公理和断言。同样, 2 型模糊 OWL 的设计也是为了实现 2 型模糊 \mathcal{ALC} , 其与 OWL 在“Description”和“Fact”的抽象语法的定义上有如下区别:

```

Description ::= 'classID' ('[ classID ]' { 'hasLprob' ('Ldegree')' { 'hasUprob' ('Udegree')' ('Ldegree <= Udegree')'
| restriction
| unionOf (' { description } ')
| intersectionOf (' { description } ')
| complementOf (' { description } ')
| one of (' { individualID } ')
Fact ::= Individual
Individual ::= 'Individual' ('[ individualID ]' { annotation } { 'type' ('type')' { 'hasLprob' ('Ldegree')' { 'hasUprob' ('Udegree')' ('Ldegree <= Udegree')'
Ldegree ::= degree
Udegree ::= degree
degree ::= 'degree' ('real-number-between-0-and-1-inclusive')
    
```

上面提到的 ABox 中的断言可以通过 2 型模糊 OWL 来描述。例如, 声明 2 个实例: “Eagle”, “Penguin”, 假如“Eagle”对于上文提到的模糊概念“Meat-eatingObject”的隶属度在区间 $[0.84, 0.93]$ 中, 同样, “Penguin”的隶属度在 $[0.22, 0.28]$ 之间。如果采用 T_1 模, 我们可以得到以下两个等式:

$$\text{Meat-eatingBird}_{[0.9, 0.95]}(\text{Eagle}) = [0.84 \times 0.9, 0.93 \times 0.95] = [0.756, 0.8835] \quad (7)$$

$$\text{Meat-eatingBird}_{[0.9, 0.95]}(\text{Penguin}) = [0.22 \times 0.9, 0.28 \times 0.95] = [0.198, 0.266] \quad (8)$$

上文已经提到 2 型模糊 DL 中的 ABox 并不存储这样的等式, 该等式是通过某些推理算法得到并将结果写入模糊实

例隶属断言集。(7)式和(8)式的结果采用 2 型模糊 OWL 来描述如下:

```

...
<Meat-eatingBird fowl; hasLprob=0.84 fowl; hasUprob=0.93 rdf:
ID="Eagle">
<Meat-eatingBird fowl; hasLprob=0.22 fowl; hasUprob=0.28 rdf:
ID="Penguin">
...
    
```

3.7 2 型模糊 \mathcal{ALC} 中的推理

逻辑推理是 DLs 中最重要的问题之一, 然而由于 DLs 强大的描述能力, 使得其推理问题比其他逻辑更显得复杂。

首先, 给出 2 型模糊 \mathcal{ALC} 的求反规则:

$$\begin{aligned} & \neg\neg C_{[a, b]} = C_{[a, b]} \\ & \neg(C_{[a, b]} \sqcap D_{[c, d]}) = C_{[1-b, 1-a]} \sqcup D_{[1-d, 1-c]} \\ & \neg(C_{[a, b]} \sqcup D_{[c, d]}) = C_{[1-b, 1-a]} \sqcap D_{[1-d, 1-c]} \\ & \neg \forall R_{[a, b]}. C_{[c, d]} = \exists R_{[a, b]}. C_{[1-d, 1-c]} \\ & \neg \exists R_{[a, b]}. C_{[c, d]} = \forall R_{[a, b]}. C_{[1-d, 1-c]} \end{aligned}$$

除了需要考虑隶属度, 2 型模糊 \mathcal{ALC} 中的包容推理规则与经典 DLs 几乎一样。这意味着对于公理: $C_{[a, b]} \sqsubseteq D_{[c, d]}$ 成立需要两个条件:

- (1) 是 D 的子类, 也就是满足 $C_{[a, b]} = C_{[a, b]} \sqcap D_{[c, d]}$ 。
- (2) a, b, c, d 满足不等式: $0 \leq a \leq c \leq d \leq 1$ and $0 \leq a \leq b \leq d \leq 1$ 。

Tableau 算法是 DL 最著名也是最基础的推理算法之一。Tableau 利用求反可以不再直接判断概念之间的包容关系: $C \sqsubseteq D$ iff $\neg C \sqcap D = \perp$, 即可将概念包容关系转化为可满足关系。2 型模糊 Tableau 判断一个概念是否是可满足的, 可以采取以下步骤: 从 ABox: $A_0 = \{ C_{[a, b]}(x)_{[c, d]} \}$ 开始, 采取以下 5 种推理规则来检查概念 $C_{[a, b]}$ 的可满足性 (不考虑基数限制)。

\sqcap -rule: 如果 A 包含 $C_{[a, b]}(x)_{[c, d]}$, 以及 $C_{[e, f]}(x)_{[g, h]}$: 如果 $[a, b] \cap [e, f] \neq \emptyset$ 并且 $[c, d] \cap [g, h] \neq \emptyset$, 则将 A 扩展为 $A' = A - \{ C_{[a, b]}(x)_{[c, d]}, C_{[e, f]}(x)_{[g, h]} \} \sqcup \{ C_{[S(a, e), T(b, f)]}(x)_{[S(c, g), T(d, h)]} \}$, 否则 $A' = A - \{ C_{[a, b]}(x)_{[c, d]}, C_{[e, f]}(x)_{[g, h]} \}$ 。

\sqcap -rule: 如果 A 包含 $(C'_{[e, f]} \sqcap C''_{[g, h]})_{[a, b]}(x)_{[c, d]} = (C' \sqcap C'')_{[T(T(e, f), T(g, h), b)]}(x)_{[c, d]}$, 但是不包含 $C'_{[e, f]}(x)_{[c, d]}$ 以及 $C''_{[g, h]}(x)_{[c, d]}$, 则将 A 扩展为 $A' = A \sqcup \{ C'_{[e, f]}(x)_{[c, d]}, C''_{[g, h]}(x)_{[c, d]} \}$ 。

\sqcup -rule: 如果 A 包含 $(C'_{[e, f]} \sqcup C''_{[g, h]})_{[a, b]}(x)_{[c, d]} = (C' \sqcup C'')_{[S(S(e, f), a), S(S(g, h), b)]}(x)_{[c, d]}$, 但不包含 $C'_{[e, f]}(x)_{[c, d]}$ 或者 $C''_{[g, h]}(x)_{[c, d]}$, 则将 A 扩展为 $A' = A \sqcup \{ C'_{[e, f]}(x)_{[c, d]} \}$ 或者 $A' = A \sqcup \{ C''_{[g, h]}(x)_{[c, d]} \}$ 。

\exists -rule: 如果 A 包含 $(\exists R_{[e, f]}. C_{[g, h]})(x)_{[c, d]}$, 但是不存在实例 z , 使得 $R_{[e, f]}(x, z)_{[c, d]}$ 以及 $C_{[g, h]}(z)_{[c, d]}$, 则将 A 扩展为 $A' = A \sqcup \{ R_{[e, f]}(x, y)_{[c, d]}, C_{[g, h]}(y)_{[c, d]} \}$, 其中 y 为 A 中不曾出现的实例。

\forall -rule: 如果 A 包含 $(\forall R_{[e, f]}. C_{[g, h]})(x)_{[c, d]}$, 以及 $R_{[e, f]}(x, y)_{[c, d]}$, 但不包含 $C_{[g, h]}(y)_{[c, d]}$, 则将 A 扩展为 $A' = A \sqcup \{ C_{[g, h]}(y)_{[c, d]} \}$ 。

与经典 Tableau 相似, \sqcup -rule 会产生多个 ABox, 从而形成一个 ABox 集合 $S_1 = \{ A_1, A_2, \dots, A_n \}$, 其中 S_1 为一致 (即不含冲突的) 的当且仅当 S_1 中任何一个 ABox 为一致的。因此, 如果根据模糊 Tableau 从 $C_{[a, b]}$ 推导出一个有限集合 S_k 中如果不存在冲突, 如: $C_{[0, 0]}(x)$ 或者 $\perp(x)$, 则可以认为 $C_{[a, b]}$ 为可满足的。

决定 2 型模糊 \mathcal{ALC} 中 ABox 的可满足性与经典 Tableau 有所不同。如果 DLs 系统为隶属度区间, 设定两个阈值 T_L 以及 T_U 。如果某个模糊概念或者实例的隶属区间包含于 $[0, T_L]$, 则可以认为该模糊概念或实例存在的可能性为 0。这意味着, 一旦 $\mu^{L(U)}(C) \leq T_L$, 描述概念 C 的公理将在该 DL 系统中不成立。相反, 如果 $\mu^{L(U)}(C) \geq T_U$, 则 C 在 DL 系统中一定成立。因此, 一旦发生以下任何一种情况, 2 型模糊 Tableau 推理过程将停止:

(1) 推理过程中出现了类似: $(\perp(x), (C \sqcap \neg C)(x), \text{etc.})$ 的冲突。

(2) 所有的推理规则 (\sqcap -rule, etc.) 全部被执行完毕。

(3) 推理过程中出现了类似: $(C_{[0,0]}(x)=[c, d], C_{[a,b]}(x)=[c, d], C_{[c,d]}(x)=[a, b]$ with $a \leq b \leq T_L, C_{[a,b]}(x)$ 以及 $C_{[c,d]}(x)$ 其中 $[a, b]$ 与 $[c, d]$ 没有交界) 的模糊冲突。

正确性: 假设 S_1 是由有限 ABox 集合 S 经过某规则推理后得出的 ABox 集合, 则有 S 为一一致的当且仅当 S_1 为一一致的。证明: 由于 S_1 的一致性可得 S_1 中至少存在一个 ABox A , 不存在冲突, 则至少存在一个模型可以使 S 一致并使得 $C_{[a,b]}$ 为可满足的。

复杂度: 由于不考虑数值限制, 并且树的分支都是独立的, 2 型模糊 Tableau 的复杂度是 $2 \times n$, 其中 n 为概念 $C_{[a,b]}$ 转化成原子概念的层数。

4 基于模糊本体的信任管理系统

4.1 F-OntoTM

信任管理模型是开放式网络信息安全的基础。而在信任管理中, 对主观信任进行研究远比对客体之间的信任关系进行研究要复杂得多。主体间的信任由于涉及到对其他主体的主观认识, 具有模糊性, 因而无法用常规的精确逻辑来描述和处理。2 型模糊 \mathcal{ALC} 的提出能够处理类似主观信任的问题, 我们针对信任管理设计并实现了名为 F-OntoTM 的模糊本体。

对每一种类型的信任来说都存在两种信任方式: 直接信任和推荐(间接)信任。作为一个基于模糊本体的信任管理系统, F-OntoTM 通过 DL 公理来描述这两种信任方式:

$$\text{Trust}_{[a_1, b_1]}(t)_{[c_1, d_1]}, \text{trust_sub}_{[a_2, b_2]}(t, p)_{[c_2, d_2]}, \text{trust_obj}_{[a_3, b_3]}(t, q)_{[c_3, d_3]}, \text{trust_type}_{[a_4, b_4]}(t, c)_{[c_4, d_4]}, \text{trust_p}_{[a_5, b_5]}(t, w)_{[c_5, d_5]}, \text{TrustSub}_{[a_6, b_6]}(p)_{[c_6, d_6]}, \text{TrustSub}_{[a_7, b_7]}(q)_{[c_7, d_7]}, \text{TrustType}_{[a_8, b_8]}(c)_{[c_8, d_8]}, \text{ComWhit}_{[a_9, b_9]}(w)_{[c_9, d_9]}, \text{trust_obj}_{[a_{10}, b_{10}]}(t, r)_{[c_{10}, d_{10}]}, \text{TrustRec}_{[a_{11}, b_{11}]}(r)_{[c_{11}, d_{11}]} \quad (9)$$

式(9)中的断言能够对直接信任和推荐信任进行描述; 该 DL 系统中存在一个类 Trust, 表示该信任管理系统包含一个信任规则集合。该类有四条属性, 分别为: trust_sub , trust_obj , trust_type and trust_p , 用于描述信任主体、信任客体、信任类型以及信任权重。这几条属性可以根据以下格式表述一条信任规则: 信任主体能够在一定程度(权重)上, 以某种信任类型信任信任客体。其中, 主体类(包括信任主体、客体) TrustSub 是主体的集合, 是信任主体和信任客体属性的值域。TrustRec 描述了推荐信任的集合, 其中 TrustRec 可以作为主体, 并只能作为信任客体, 所以被认为是 TrustSub 的子类。类 ComWhit 的实例用于计算由不同信任类型得到最终信任向量的值, TrustType 描述了每条信任的类型细节。

4.2 F-OntoTM 的实现

现实世界里, 主体无法武断的决定信任或是不信任另一

个主体, 比较可以接受的方法是在某种程度上信任或是不信任另一个主体。F-OntoTM 即是使用 2 型模糊 \mathcal{ALC} 来描述信任管理中的不确定信息, 并相应地使用 2 型模糊 OWL 来实现这些模糊扩展。正如上文所述, 在原子概念的描述中增加两条属性, 则可以完成 2 型模糊 ALC 的扩展。F-OntoTM 的 OWL 文件片断如下:

```
...
<Trust rdf:ID="Trust_01" fowl:hasLprob=0.68 fowl:hasUprob=0.75>
  <trust_sub fowl:hasLprob=0.87 fowl:hasUprob=0.91
  rdf:resource="#Subject_03"/>
  <trust_type fowl:hasLprob=0.85 fowl:hasUprob=0.89
  rdf:resource="#type_01"/>
  <trust_obj fowl:hasLprob=0.93 fowl:hasUprob=0.97
  rdf:resource="#Subject_04"/>
  <trust_p rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
  XMLSchema#string">0.3</trust_p>
</Trust>
<Trust rdf:ID="Trust_02" fowl:hasLprob=0.71 fowl:hasUprob=0.77>
  <trust_sub fowl:hasLprob=0.85 fowl:hasUprob=0.90
  rdf:resource="#Subject_03"/>
  <trust_type fowl:hasLprob=0.80 fowl:hasUprob=0.89
  rdf:resource="#type_02"/>
  <trust_obj fowl:hasLprob=0.91 fowl:hasUprob=0.95
  rdf:resource="#Subject_04"/>
  <trust_p rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
  XMLSchema#string">0.7</trust_p>
</Trust>
<Trust rdf:ID="Trust_03" fowl:hasLprob=0.87 fowl:hasUprob=0.97>
  <trust_sub fowl:hasLprob=0.63 fowl:hasUprob=0.81
  rdf:resource="#Subject_04"/>
  <trust_type fowl:hasLprob=0.80 fowl:hasUprob=0.89
  rdf:resource="#type_01"/>
  <trust_obj fowl:hasLprob=0.77 fowl:hasUprob=0.85
  rdf:resource="#Subject_05"/>
  <trust_p rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
  XMLSchema#string">0.4</trust_p>
</Trust>
<Trust rdf:ID="Trust_04" fowl:hasLprob=0.88 fowl:hasUprob=0.90>
  <trust_sub fowl:hasLprob=0.73 fowl:hasUprob=0.80
  rdf:resource="#Subject_04"/>
  <trust_type fowl:hasLprob=0.90 fowl:hasUprob=0.99
  rdf:resource="#type_02"/>
  <trust_obj fowl:hasLprob=0.90 fowl:hasUprob=0.95
  rdf:resource="#Subject_05"/>
  <trust_p rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/
  XMLSchema#string">0.6</trust_p>
</Trust>
...
```

第一个实例描述名为“Trust_01”的信任规则, 该规则描述权重为 0.3、类型为“type_01”的从“Subject_03”到“Subject_04”的信任关系, 并且信任程度在 0.68 和 0.75 之间。同理, 剩下的代码也描述了类似“Trust_01”的三个实例, 则可以根据(10)式计算出“Subject_03”对“Subject_04”的直接信任程度:

$$\text{trust_value} \subseteq \left[\sum_{i=1}^n \text{trust_Lpro}_i \times w_i, \sum_{i=1}^n \text{trust_Upro}_i \times w_i \right] \quad (10)$$

如果采用对偶模 (T_1, S_1) , “Subject_03”能够信任“Subject_04”的概率区间为: $0.68 \times 0.87 \times 0.85 \times 0.93 \times 0.3 + 0.71 \times 0.85 \times 0.80 \times 0.91 \times 0.7, 0.75 \times 0.91 \times 0.89 \times 0.97 \times 0.3 + 0.77 \times 0.90 \times 0.89 \times 0.95 \times 0.7 \approx [0.45, 0.59]$ 。同理: “Subject_04”能够信任“Subject_05”的概率区间为: $[0.45, 0.64]$ 。如果采用 (T_1, S_1) 计算信任传递, 则有“Subject_03”能够信任“Subject_05”的概率区间为: $[0.45 \times 0.45, 0.59 \times 0.64] \approx [0.20, 0.38]$ 。如果设定 $T_L = 0.3, T_U = 0.5$, 由于 $0.20 \leq 0.3, 0.38 \leq 0.5$, 有“Subject_03”对“Subject_05”的信任程度可以被认为是 0, 即“Subject_03”无法信任“Subject_05”, 则推理机可以认为公理: Trust(t),

(下转第 240 页)

结合阈值处理准确的分割出目标,是一种新颖的和有效的红外图像分割方法。

参考文献

- 1 Braga-neto U, Goutsias J. A theoretical tour of connectivity in image processing and analysis [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2003, 19: 5~31
- 2 Braga-neto U, Goutsias J. A multiscale approach to connectivity [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 89: 70~107
- 3 Braga-neto U, Goutsias J. A Complete Lattice Approach to Connectivity in Image Analysis [R]; [Technical Report JHU/ECE 00 - 05]
- 4 Serra J. Connectivity on complete lattices [J]. J. Math. Imag.

- Vis., 1998, 9: 231~251
- 5 Serra J. Connections for sets and functions [J]. Fund. Inform, 2000, 41: 147~186
- 6 Braga-Neto U M, Goutsias J. Connectivity on complete lattices; new results [J]. Comput. Vis. Image Understanding, 2002, 85: 22~53
- 7 Braga-Neto U, Goutsias J. Grayscale level connectivity theory and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12)
- 8 Salembier P, Serra J. Flat zones filtering, connected operators, and filters by reconstruction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4 (8): 1153~1160
- 9 吴巍, 彭嘉雄, 王海晖. 红外图像序列小目标的特性分析与检测 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2)

(上接第 207 页)

trust_sub(t, Subject_03) and trust_obj(t, Subject_05)在 ABox 中无法成立。通过以上方法,我们能够基于 2 型模糊 OWL,通过 F-OntoTM 描述并处理信任管理模型中的模糊信息。

结论 2 型模糊 DLs 的提出是为了更加精准地表达和推理 DL 系统中的模糊信息。作为 2 型模糊 DLs 的基础,本文阐述了 2 型模糊 \mathcal{ALC} 的基本语法、语义、推理算法及其应用。与 1 型模糊 \mathcal{ALC} 相比,2 型模糊 \mathcal{ALC} 能够更好地处理模糊知识。除了语义网,还有很多基于 DLs 的应用(例如信任管理)需要处理模糊信息。总之,2 型模糊 \mathcal{ALC} 能够应用到许多领域来增强其表达及推理能力。今后的工作包括 2 型模糊 \mathcal{ALC} 、 \mathcal{ELN} 、 $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ 及其对这些 DL 的推理算法。

参考文献

- 1 Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic web. The Scientific American, 2001, 284(5): 34~43
- 2 Horrocks I, Patel-Schneider P F, van Harmelen F. From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language. Journal of Web Semantics, 2003, 1(1): 7~26
- 3 Baader F, Calvanese D, McGuinness D L, et al. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge University Press, 2003. 47~100

- 4 Calvanese D, Lenzerini M, Nardi D. Unifying class-based representation formalisms. Journal of Artificial Intelligence Research, 1999, 11(2): 199~240
- 5 Bechhofer S, van Harmelen F, Hendler J, et al. L. A. S.: OWL Web Ontology Language Reference. 2004
- 6 Blaze M, Feigenbaum J, Lacy J. Decentralized trust management. In: Dale J, Dinolt G eds. Proceedings of the 17th Symposium on Security and Privacy. Oakland; IEEE Computer Society Press, 1996. 164~173
- 7 Blaze M, Feigenbaum J, Keromytis AD. Keynote: Trust management for public-key infrastructures. In: Christianson B, Crispo B, William S, et al. eds. Cambridge 1998 Security Protocols International Workshop. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 59~63
- 8 Beth T, Borcherding M, Klein B. Valuation of trust in open networks. In: Gollmann D ed. Proceedings of the European Symposium on Research in Security (ESORICS). Brighton; Springer-Verlag, 1994. 3~18
- 9 Zadeh L A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, 8 (3): 338~353
- 10 Meghini C, Sebastiani F, Straccia U. Reasoning about the Form and Content for Multimedia Objects. In: Proceedings of AAAI 1997 Spring Symposium on Intelligent Integration and Use of Text, Image, Video and Audio, California, 1997. 89~94
- 11 Straccia U. Reasoning Within Fuzzy Description Logics. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001, 14: 137~166
- 12 Straccia U. Transforming Fuzzy Description Logics into Classical Description Logics. In: Proceedings of the 9th European Conference on Logics in Artificial Intelligence, Lisbon, 2004. 385~399
- 13 Straccia U. Towards a Fuzzy Description Logic for the Semantic Web. In: 1st Proceedings of Fuzzy Logic and the Semantic Web Workshop, Marseille, 2005. 3~18

(上接第 215 页)

式中 F_{\max} —施加的最大驱动力, β —切换角, $k=0, 1, 2, \dots$ 。

4 系统软件设计

本软件基于 Windows98 开发, Windows98 是一个多任务操作系统, 允许多个线程并行工作。本软件包括摆起控制和视觉采集两个线程。控制线程为摆起控制部分, 当系统开始工作时, 运行摆起程序, 使摆杆摆到能够用其他稳定控制程序控制的平衡范围之内, 然后可以转入通过电位器获得摆杆角度的其他稳定控制程序中。视觉采集线程主要由视觉传感器的初始化、图像采集和特征提取三部分组成。两个线程之间通过消息响应的方式进行通信。在程序开始运动时, 首先启动视觉采集线程, 使视觉传感器开始工作, 当视觉采集线程完成一帧图像的处理, 从中提取出摆杆转动的角度和角速度之后, 便向控制线程发送一个消息, 控制线程调用相关的消息响应函数, 完成对角度和角速度的采集。

系统的运行结果如图 5 所示。

结论 基于视频的倒立摆摆起控制系统提供了一个从视觉角度非接触式的检测倒立摆状态的一个途径, 成功的利用视频图像确定的位置反馈信息使得倒立摆摆杆从自由平衡状态摆起到竖直平衡位置附近。如能采取更好的硬件设备, 提高图像处理速度, 则可以在这个系统上来进行倒立摆的稳定控制, 对视觉伺服开展进一步的研究。

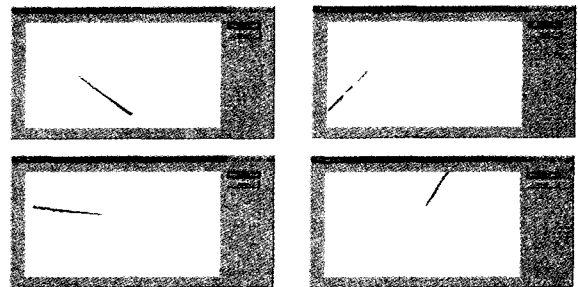


图 5 系统运行结果图

参考文献

- 1 丛爽, 张冬军, 魏衡华. 单级倒立摆三种控制方法的对比研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(11)
- 2 Magana M E, Holzapfel F. Fuzzy-Logic Control of an Inverted Pendulum with Vision Feedback [J]. IEEE Transactions on Education, 1998, 41(2): 165~170
- 3 GM-400 运动控制器用户手册. 深圳固高科技有限公司, 2001
- 4 胡俊, 苏祥芳, 刘立海. 图像序列中运动检测算法的研究及应用 [J]. 武汉大学学报(自然科学版), 2000, 46(5)
- 5 Wenzel L, Vazquez N. Computer vision based inverted pendulum [A]. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000, IMTC 2000. Proceeding. of the 17th IEEE[C]. Volume: 3, 2000. 1319~1323
- 6 谢冬梅, 曲道奎, 徐方. 基于神经网络的机器人视觉伺服控制 [J]. 微计算机信息, 2006(2-1): 4~6, 274