

描述逻辑综述^{*})

石 莲 孙吉贵

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

(吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)

摘要 描述逻辑是一种知识表示的形式化语言,是一阶逻辑的可判定子集。作为一种知识表示的有效机制,描述逻辑被广泛地应用到计算机科学的许多领域中。本文对目前描述逻辑的研究与应用现状进行了综述性的介绍,并且从描述逻辑的定义、描述逻辑的基本语法及语义、体系结构以及描述逻辑在语义 Web 中的地位等方面做了系统阐述。

关键词 描述逻辑,知识表示,语义 Web,本体

Description Logic Survey

SHI Lian SUN Ji-Gui

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012)

(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineer of Ministry of Education, Changchun 130012)

Abstract Description logic is a formal language for representing knowledge and it is a decidable subset of first-order logic. As an effective mechanism of knowledge representation, description logic is extensively applied to various fields of computer science. The authors give a survey to today's researches and applications of description logics, and then analyze description logic in terms of its definition, the basic syntax and semantic, as well as its system architecture and the role description logic played in the semantics Web and so on.

Keywords Description logic, Knowledge representation, Semantic Web, Ontology

1 引言

描述逻辑(DLs)是知识表示的一种形式化语言^[1],适合表示关于概念和概念层次结构的知识,因此也叫做概念表示语言和术语逻辑。描述逻辑统一了大家所熟悉的基于框架(Frames)、语义网络(Semantic Networks)、面向对象的表示(Object-oriented Representation)以及语义数据模型(Semantic Data Models)系统的逻辑基础^[2],并给出一种形式化的、基于逻辑的语义。描述逻辑的基本构件是概念(concept)、关系(role)和个体(individual)。概念描述了一个个体集合的共同属性,并且可将概念解释为对象集的一元谓词,将关系解释为对象之间的二元关系^[3]。描述逻辑的特点在于,将大量的构造符作用到简单概念上,从而可以建立更多复杂的概念。另外,DLs将推理作为中心服务,即从知识库中显式包含的知识推导出隐含表示的知识^[4]。DLs注重关键推理服务的可判定性,并且提供了可靠的、完备的推理算法。其主要的推理有分类(classification)、可满足性问题、包含关系以及实例检测。分类是对一个基于包含关系的概念层次结构的计算,即判断一个术语表中不同概念之间的子概念/超概念的关系。实例检测是判断一个个体是否是某个概念中的实例。

描述逻辑知识库(Knowledge Base)通常包含两个部分:Tbox 和 Abox。其中,Tbox 是有关概念和关系的蕴涵断言集合,描述概念和关系的一般属性;Abox 是有关个体的实例断言集合,断言一个个体是某个概念的实例,或者两个个体之间存在某种关系。

描述逻辑系统有四个基本的组成部分:用于概念和关系表达式中的构造算子集合;容许在 Tbox 中出现的公理类型;容许在 Abox 中出现的断言类型;在 Tbox 和 Abox 上进行推理的推理机制。

2 描述逻辑

本节首先给出知识表示的主要方法,然后介绍描述逻辑的发展,接着阐述描述逻辑的语法及语义,最后分析描述逻辑的体系结构。

2.1 知识表示

知识表示的方法是在 20 世纪 70 年代开始发展起来的^[3],可以大致分为两类:

- 基于逻辑的知识表示方法。其中表示语言通常是一阶谓词逻辑的变异,推理相当于证明逻辑推论。但是一阶逻辑的表达能力太强,如果不加任何约束,很有可能破坏知识结构,导致无法进行有效的推理^[5]。

- 非基于逻辑的表示方法。通常是基于图形化界面的使用,知识通过某种特殊的数据结构来表示,推理可以简单地通过处理结构的特殊过程来完成。

在众多的知识表示方法中,有两种非常重要^[3]:语义网络(semantic networks)和框架系统(frames)。但由于语义网络和框架系统都缺乏精确的语义,在实际系统中表现都不尽如人意。因此,对框架系统赋予基于一阶逻辑的语义^[3],这在知识表示方法上向前迈出了重要的一步。接着,开始了在术语系统(terminological systems)下的描述逻辑领域的研究。

^{*}国家自然科学基金(60273080,60473003)、吉林省杰出青年基金(20030107)资助课题。石 莲 硕士研究生,主要研究方向是描述逻辑;孙吉贵 博士生导师,主要研究方向是人工智能、约束程序、决策支持系统。

2.2 描述逻辑的发展

描述逻辑的一个重大突破是 Ron Brachman 和 Hector Levesque 在文[6]中阐明了描述语言的表示能力和推理复杂性之间所存在的矛盾。一方面,如果描述语言的表示能力太强,可能会导致不可判定的推理;另一方面,如果表示能力太弱,又不足以表示应用领域的知识。怎样权衡两者之间的关系,成为描述逻辑的一个重要研究课题。根据对该问题的研究进展,可以将描述逻辑的发展大致分为四个阶段[7]。

阶段 1(1980~1990):主要关注对一些系统的实现,比如 KLONE、K-REP、BACK 和 LOOM [8~11]等。这些系统都基于结构化(structural)的包含关系算法,其缺点在于该算法仅对表示能力弱的 DLs 完备,而对表示能力较强的 DLs,则无法检测出已经存在的包含或实例关系[7]。

阶段 2(1990~1995):开发了基于表(tableau)的算法[12~14],并实现了第一批基于该算法的系统(Kris, Crack)。从这个阶段,人们正式开始对各种 DLs 的推理复杂性进行分析[15~17]。另外一个重要的发现就是描述逻辑与模态(modal logic)逻辑有着紧密的关系[18]。

阶段 3(1995~2000):对各种表示能力强的 DLs,开发了许多优化的 tableau 算法,并且优化的描述逻辑系统(FACT, RACE 和 DLP[19~21])证明了这些优化 tableau 算法的良好性能。另外,人们对 DLs 与模态逻辑[22,23]之间的关系,以及 DLs 与一阶逻辑的可判定子集之间的关系都进行了详细的研究[24~28]。

阶段 4(目前):正在开发具有商业价值的 DL 系统,其中采用了表示能力比较强的描述语言以及基于 tableau 的算法。描述逻辑在计算机科学领域中开始受到高度重视并进行推广应用[7,29~35]。

2.3 基本的描述语言

DLs 中最基本的描述语言是 ALC,其他的描述语言都是

在 ALC 上扩展得到的,并且根据构造符的不同对描述语言加以区分。如果使用 A 和 B 表示原子概念, R 表示原子关系, C 和 D 表示概念描述, I 是一个解释,则可以用图 1 来说明 ALC 语法和语义。

另外,DLs 中还有其他的构造符,如 number restriction ($\geq n.R$ 或 $\leq n.R$)。关系构造符有 inverse(R^{-1}), transitive closure(R^+), intersection ($R \sqcap S$), union ($R \sqcup S$), complement ($\neg R$), composition($R \circ S$)等。通过使用大量的构造符,大大增强了描述语言的表示能力,从而形成了 DLs 语言的一个大家族。

2.4 描述逻辑的基本体系

基于描述逻辑的知识表示系统(DLKRS)包含一个知识库(knowledge base)及其提供的推理服务。其中一个知识库包含两个组成部分:Tbox 和 Abox。Tbox 引入应用领域的术语表(terminology);Abox 包含对个体的实例断言(instance assertion)和关系断言(role assertion)。另外,DLKRS 提供了大量的推理服务,尤其是对包含(subsumption)关系和(instantiation)关系的推理。

2.4.1 Tbox Tbox 中包含了应用领域的内涵(intentional)知识,通常以术语公理(terminological axioms)的形式描述概念和任务的事实。一般术语公理有两种形式。

- 蕴涵(inclusion): $C \sqsubseteq D (R \sqsubseteq S)$, 例如 $\text{Man} \sqsubseteq \text{Human}$
- 等式(equality): $C \equiv D (R \equiv S)$, 例如

$\text{Mother} \equiv \text{Woman} \sqcap \exists \text{hasChild. Person}$, 其中 C 和 D 是概念, R 和 S 是关系。

对于一个解释 I ,如果有 $C^I \subseteq D^I (C^I = D^I)$,那么 I 满足蕴涵 $C \sqsubseteq D (C \equiv D)$ 。如果 T 是一个公理(公理集),那么 I 满足 T ,当且仅当 I 满足 T 中的每一个公理,并称 I 是该公理(公理集)的模型。

表 1 ALC 的语法及语义

构造算子	语法	语义	例子
atomic concept	A	$A^I \in \Delta^I$	Human
top concept	\top	Δ^I	$\text{Male} \sqcup \neg \text{Male}$
bottom concept	\perp	\emptyset	$\text{Man} \sqcap \neg \text{Man}$
atomic negation	$\neg A$	$\Delta^I \setminus A^I$	$\neg \text{Man}$
concept negation	$\neg C$	$\Delta^I \setminus C^I$	
concept disjunction	$C \sqcup D$	$C^I \cup D^I$	$\text{Man} \sqcup \text{Woman}$
concept conjunction	$C \sqcap D$	$C^I \cap D^I$	$\text{Human} \sqcap \text{Male}$
existential quantification	$\exists R.C$	$\{a \in \Delta^I \mid \exists b.(a,b) \in R^I \wedge b \in C^I\}$	$\exists \text{has-Child.Male}$
value restriction	$\forall R.C$	$\{a \in \Delta^I \mid \forall b.(a,b) \in R^I \rightarrow b \in C^I\}$	$\forall \text{has-Child.Doctor}$

2.4.2 Abox Abox 中包含了应用领域的外延(extensional)知识,通常以实例化公理断言个体及个体之间的事实。一般实例化公理有两种形式。

• 概念断言 $C(a)$:个体 a 属于概念 C 。例如 $\text{Student}(\text{JOY})$ 。

• 关系断言 $R(a,b)$:个体 a 和 b 存在 R 关系。例如 $\text{has-Child}(\text{MARY}, \text{PAUL})$ 。

其中, a 和 b 是个体名, C 是概念, R 是关系。

对于一个解释 I ,如果有 $a^I \in C^I$ 或者 $(a^I, b^I) \in R^I$,那么 I 满足断言 $C(a)$ 或者 $R(a,b)$ 。如果 I 满足 Abox A 中的每个

断言,那么 I 满足 A ,并且称 I 是该 Abox 的一个模型。

2.4.3 描述逻辑中的推理 DL 系统提供了不同种类的推理服务,可以将它们定义为逻辑推理。首先讨论对概念的推理,然后是有关 Tbox 和 Abox 的推理。最后,这些都可归结为一个主要的推理问题,那就是 Abox 的一致性检测[2]。

有关概念的推理有四个,其形式化定义如下。这里设 T 是一个 Tbox。

可满足性(Satisfiability):如果存在一个 T 的模型 I ,使得 C^I 不为空,那么称概念 C 关于 T 是可满足的,并且称 I 是 C 的一个模型。

包含性(Subsumption):如果对于 T 的每个模型 I , 都有 $C' \sqsubseteq D'$, 那么称概念 D 关于 T 包含概念 C , 记为 $C \sqsubseteq_T D$ 或者 $T \models C \sqsubseteq D$ 。

相等关系(Equivalence):如果对于 T 中的每个模型 I , 都有 $C' = D'$, 那么称概念 C 和概念 D 关于 T 是相等的。记为 $C \equiv_T D$ 或 $T \models C \equiv D$ 。

不相交关系(Disjointness):如果对于 T 中的每个模型 I , 都有 $C' \cap D' = \emptyset$, 那么称概念 C 和概念 D 关于 T 是不相交的。

Tbox 中的基本推理任务就是 subsumption。通过对概念之间的包含关系, 来构建 terminology 中的层次结构, 这样可以使得推理更容易。Abox 中的基本任务就是实例检测, 检验一个给定的个体是否是一个概念的实例。Abox 中其它的推理还包括知识库一致性 (consistence), 检测知识库中的每个概念是否至少有一个实例; 实现 (realization), 是指找到一个最精确的概念, 使得给定的个体是该概念的一个实例; 返回 (retrieval), 是指从知识库中找出一个给定概念的所有实例。这些推理任务都可以由实例检测来完成。

3 描述逻辑的应用

随着 10 多年来对描述逻辑的深入研究, DLs 已经应用于软件工程、配置、概念建模、信息综合、查询机制、视图维护、软件管理系统、规划系统、布局系统和自然语言处理^[2,36,37]。目前, DL 作为本体(ontology)语言, 在语义 Web (semantic web) 中, 发挥了巨大的作用^[7]。

3.1 在语义 Web 中的应用

目前, 随着万维网的广泛普及, 改变了人们的交流方式, 甚至改变了商业的运作方式。人们可以从 Web 上获取大量所需的信息, 可以在线购物、在线娱乐等等, 万维网给人们带来了巨大的乐趣。如今, Web 上各种各样的信息正在迅速增长, 这些信息包括文本、声音、图像、应用程度等等。但是由于这些信息缺乏统一的描述形式, 给各领域资源管理带来诸多困难。另外, 当人们使用搜索引擎查询时, 大多数情况返回给用户的只是一些超链接, 即便返回的是 Web 页面, 由于目前 Web 上的大多数信息都是以人类可理解的(如 HTML)方式来表示, 使得计算机无法识别页面的内容, 还需要人们自己来浏览、抽取、整理信息, 这使得 Web 缺乏智能行为。更令人头痛的是, 返回的大量信息还可能是无关的, 这样就会大大降低信息查询的查准率和查全率。为了实现面向机器理解的万维网, Tim Berners-Lee 于 2001 年正式提出了新一代网络——语义 Web (semantic web)^[38]。语义万维网是当前万维网的扩展, 使得万维网上的信息具备良好定义的含义, 可以帮助人类和计算机更好地相互交流及协同工作。

目前各个网站通常以不同的样式和格式来组织编写页面, 这使得页面内容很难被自动抽取和处理^[7]。语义万维网的目的在于使 Web 资源是面向机器可理解的, 并且这些信息可以通过自动工具及人类用户共享和处理^[7]。不同 Agents 之间信息的共享要求有语义标记, 也就是说在含有信息的网页上做标记 (annotation), 这样就可以被搜索 Web 的 agents 所理解。可以通过一个标准化的、表示能力较强的语言来定义标记。为了保证不同的 Agents 对这些术语做相同的解释, 就需要本体来解决这个问题。文[39]对本体进行了形式化定义。本体作为一种能在语义和知识层次上描述信息概念模型建模工具^[40], 在语义 Web 中扮演非常重要的角色, 并

且也是实现语义 Web 的关键技术。

由于 DLs 可以为本体提供良好定义的、精确的语义以及强大的推理工具, 因此 Franz Baader 和 Ian Horrocks 等人在文[7]中提出了将描述逻辑作为本体语言应用到语义网中, 给出了本体语言 DAML+OIL^[41,42]与描述语言 SHIQ^[43]之间的关系和转化, 并且使用 SHIQ 描述本体以及有关 SHIQ 的推理。描述逻辑因此成为人们的研究热点, 并且随着语义 Web 概念的不断升温, 描述逻辑将发挥巨大的作用。

3.2 在配置中的应用

配置(Configuration)是描述逻辑的一个成功应用领域。文[32]简单介绍了配置问题以及隐含的一些属性和特点。以一个立体声系统 (stereo) 的配置器 (configurator) 为例, 阐述了使用基于描述逻辑的方法处理配置问题, 并且介绍了基于描述逻辑的配置器的最大家族: PROSE/QUESTAR 系统。事实证明, 基于描述逻辑的方法解决了概念建模 (conceptual modeling) 和配置器维护 (maintenance) 中的许多问题。

3.3 在自然语言处理中的应用

KL-ONE 系统早期用于自然语言处理 (natural language processing) 中的语义解释, 这是描述逻辑的主要应用之一。首先在一个知识库中嵌入一些实际所需的语法及语义元素, 然后通过 DLs 来驱动语义解释和自然语言的产生过程。文[33]做出了详细介绍。

3.4 在数字图书馆和基于 Web 的信息系统中的应用

Web 的智能化离不开本体, 描述逻辑在这个研究领域中做出了重大的贡献。它提供了形式化基础, 并且基于描述逻辑的语言设计为 Web 本体的开发和应用提供了有利条件。文[34]详细介绍了两种重要的本体语言 OIL^[44]和 DAML+OIL。

3.5 在数据库中的应用

文[35]总结了描述逻辑在数据库 (data bases) 中的主要应用及其推理服务, 包括: (1) 表示数据来源的概念化领域模型或本体; (2) 整合多个数据来源; (3) 表示及评估查询。

读者可以阅读相关文献, 了解描述逻辑的其他应用。

4 描述逻辑的研究现状

模糊描述逻辑 (Fuzzy Description logic)。描述逻辑通常处理含义明确的概念, 然而, 在现实生活中, 有许多概念没有一个精确的定义或者没有一个标准来确定其实例集合。例如, “高”这个概念。因此, 人们只能在某种程度上来判断概念的实例。模糊逻辑使用模糊谓词对模糊度以及不精确性进行处理。文[45]中将描述逻辑与模糊逻辑结合起来, 提出一个通用框架, 在 DL ALC 的基础上定义了 fuzz dl 的语法和语义, 以及约束推演的推理计算, 为新一代的描述逻辑提供了处理模糊概念的应用基础。

时态描述逻辑 (temporal description logic)。A. Artale 和 E. Franconi 曾提出了一个知识表示系统, 用时间约束的方法将状态、动作和规划的表示统一起来。为了能使该表示方法进行有效的推理和明确的语义, 又和描述逻辑结合起来, 从而形成了一个很好的知识表示方法。文[46]详细介绍了时态逻辑 DL_{Rus} 及其查询语言。

动态描述逻辑 (dynamic description logics)。由于描述逻辑最初只能用来表示静态知识, 因此 Wolter 等在文中对具有模态算子的描述逻辑进行了深入系统的调查分析, 并证明了恒定域假设下, 多种认知和时序描述逻辑是可判定的^[47]。他

将描述逻辑和命题逻辑 PDL 相结合,提出了动态描述逻辑。结合可能世界语义和可达关系,引入时间依赖和信念等模态操作,提出了多维描述逻辑框架。该描述逻辑较好地刻画了多主体系统模型。目前,主要研究工作集中在建立合理的模态公理及多维描述逻辑。

结束语 在众多知识表示的形式化方法中,描述逻辑在 10 多年来备受人们的特别关注,主要原因有以下三点:(1)有清晰的模型-理论机制;(2)适合通过概念分类学来表示应用领域;(3)提供了有用的推理服务。本文简要阐述了描述逻辑的基本内容及其目前的应用和研究,希望能对相关研究人员有所帮助。描述逻辑还存在巨大的应用潜力,因此仍然有许多开发和研究工作需要开展。

参 考 文 献

- 1 Description Logic. home page <http://dl.kr.org/>
- 2 刘亚彬,陈岗. 基于描述逻辑的空间推理研究. 计算机科学, 2004, 31(8)
- 3 Baader F, Nutt W. Basic Description Logics. In: Baader F, McGuinness, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook, Chapter 2, Cambridge Univ Press, 2003
- 4 De Giacomo G, Lenzerini M. TBox and ABox Reasoning in Expressive Description Logics. KR 1996. 316~327
- 5 史忠植. 高级人工智能. 科学出版社
- 6 Brachman R J, Levesque H J. The tractability of subsumption in frame-based description languages. In: Proceedings of the 4th National Conference of the American Association for Artificial Intelligence (AAAI-84), Austin, TX, 1984. 34~37
- 7 Baader F, Horrocks I, Sattler U. Description logics as ontology languages for the semantic web. In: Hutter D, Stephan W, eds. Festschrift in honor of Jörg Siekmann, Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, 2003
- 8 Brachman R J, Schmolze J G. An overview of the KL-ONE knowledge representation system. Cognitive Science, 1985, 9(2): 171~216
- 9 Mays E, Dionne R, Weida R. K-REP system overview. SIGART Bulletin, 1991, 2(3)
- 10 Peltason C. The BACK system—an overview. SIGART Bulletin, 1991, 2(3): 114~119
- 11 MacGregor R. The evolving technology of classification-based knowledge representation systems. In: Sowa J F, ed. Principles of Semantic Networks, Morgan Kaufmann, Los Altos, 1991. 385~400
- 12 Schmidt-Schauß M, Smolka G. Attributive concept descriptions with complements. Artificial Intelligence Journal, 1991, 48(1): 1~26
- 13 Donini F, Lenzerini M, Nardi D, et al. The complexity of concept languages. In: Proc. of the 2nd Int Conf on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-91), Boston, MA, USA, 1991
- 14 Hollunder B, Nutt W, Schmidt-Schauß M. Subsumption algorithms for concept description languages. In: ECAI-90, Pitman Publishing, London, 1990
- 15 Donini F, Lenzerini M, Nardi D, et al. The complexity of concept languages. In: Proc. of the 2nd Int Conf on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-91), Boston, MA, USA, 1991
- 16 Donini F M, Lenzerini M, Nardi D, et al. Tractable concept languages. In: Proc. of the 12th Int Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-91), Sydney, 1991. 458~463
- 17 Donini F M, Hollunder B, Lenzerini M, et al. The complexity of existential quantification in concept languages. Artificial Intelligence Journal, 1992(2-3): 309~327
- 18 Schild K. A correspondence theory for terminological logics: Preliminary report. In: Proc. of the 12th Int Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-91), 1991. 466~471
- 19 Horrocks I. Using an expressive description logic: FaCT or Fiction? In: Proc. of the 6th Int Conf. on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-98), 1998. 636~647
- 20 Haarslev V, Möller R. RACE system description. In: Lambrix P, Borgida A, Lenzerini M, et al. Proceedings of the International Workshop on Description Logics, Linköping, Sweden, 1999
- 21 Patel-Schneider P F. DLP. In: Proc. of the 1999 Description Logic Workshop (DL'99), CEUR Electronic Workshop Proceedings. <http://ceurws.org/Vol-22/>, 1999. 9~13
- 22 De Giacomo G, Lenzerini M. Boosting the correspondence between description logics and propositional dynamic logics. In: Proc. of the 12th Nat Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-94) AAAI Press/The MIT Press, 1994. 205~212
- 23 Schild K. Querying Knowledge and Data Bases by a Universal Description Logic with Recursion: [PhD thesis]. University at des Saarlandes, Germany, 1995
- 24 Borgida A. On the relative expressive power of Description Logics and Predicate Calculus. To appear in Artificial Intelligence, 1996
- 25 Pacholski L, Szwaast W, Tendera L. Complexity of two-variable logic with counting. In: Proc. of the 12th Ann IEEE Symp on Logic in Computer Science (LICS-97), IEEE Computer Society Press, 1997. 318~327
- 26 Gradel E, Kolaitis P G, Vardi M Y. On the decision problem for two-variable first-order logic. Bulletin of Symbolic Logic, 1997, 3(1): 53~69
- 27 Gradel E. Guarded fragments of first-order logic: A perspective for new description logics? In: Proc. of the 1998 Description Logic Workshop (DL'98). CEUR Electronic Workshop Proceedings, <http://ceur-ws.org/Vol-11/>, 1998
- 28 Gradel E. On the restraining power of guards. Journal of Symbolic Logic, 1999, 64: 1719~1742
- 29 Welty C A. Software Engineering In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications, chapter 11. Cambridge University Press, 2003
- 30 Rector A. Chapter 13: Medical Informatics. In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications, chapter 13. Cambridge University Press, 2003
- 31 Borgida A, Brachman R J. Conceptual Modeling with Description Logics. In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications, chapter 10. Cambridge University Press, 2003
- 32 McGuinness D L. Configuration. In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications. chapter 12. Cambridge University Press, 2003
- 33 Franconi E. Natural Language Processing In: Baader E, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. The Description Logic Handbook: (下转第 225 页)

上述的迭代算法完成后,可以得到一组 $\omega_1, \omega'_1, \dots, \omega_n, \omega'_n$, 将 $\omega_1, \dots, \omega_n$ 组成一个向量矩阵 A , 使用该矩阵可以进行下一步的运算。

源向量还原过程使用了最短路径算法 (shortest-path algorithm)。为简单起见,不妨假设 $m=2$, 该算法的目标是使得 $\arg \min_{x_i \rightarrow Ax} |s|_1$ 。其中混合矩阵 A 可以通过矩阵恢复过程求得。令: $A=(a_1 | \dots | a_n)$ 表示矩阵 A 的列向量。Fabian^[4] 证明了只要通过最靠近 x_i 的两个列向量 a_i 和 a_k 就可以还原出源向量 s_i 。算法的运算公式可以表述为:

$$(s_i)_j = \begin{cases} ((a_j | a_k)^{-1} x_i)_j, & i=j \\ ((a_j | a_k)^{-1} x_i)_k, & i=k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

不难验证,通过上述运算所得到的 A 和 s_i 有如下关系:
 $As_i = x_i$ 。

5 试验结果

实验采用声音混合-分离实验来测试 P-Overcomplete 结构,采用 Matlab6.5 进行编码,并在 Centrino 1.6G,512M 的 PC 上运行。在实验中,仅考虑 $n=3$ 和 $m=2$ 的情形。实验中 3 组声音信号均来自同一个人的声音,所有声音样本均以 8kHz 和 8 位的方式进行采样。3 组声音信号的信息分别为:粤语的“今日你好吗”、普通话的“你今天好吗”和英语的“How are you today”,如图 3。

将 3 组声音样本信号混合成为 2 组混合信号,其混合矩阵我们选择:

$$A = \begin{pmatrix} 0.7071 & -0.4472 & -0.9487 \\ 0.7071 & 0.8944 & 0.3162 \end{pmatrix}$$

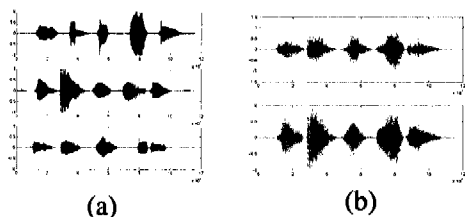


图 3 (a)采集得到的 3 组声音样本;(b)混合后得到的声音样本

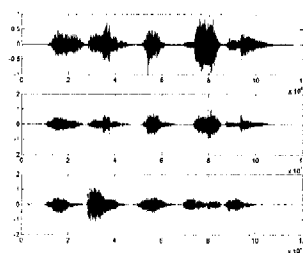


图 4 采用 P-Overcomplete 进行分解的结果

由图 4 我们可以看出, P-Overcomplete 很好地将混合的声音进行了分离,而实验结果也相当令人满意。

小结 本文提出了一种由两个 Overcomplete ICA 组成的并行结构。其中一个 Overcomplete 过程对信号的高频部分进行分离,另一 Overcomplete 过程对信号的低频部分进行分离。P-Overcomplete 中的重构器合并了高频部分和低频部分的输出,并使之作为最后的结果。由于这种方法利用了观测数据的全部信息,因此两过程有效输入的长度变为原来数据长度的一半。本文提出了一种处理 Overcomplete ICA 问题的新途径,文中的实验说明了 P-Overcomplete 结构能有效地将混合后的声音样本进行分离。

参考文献

- Lewicki M S, Sejnowski T J. Learning Overcomplete Representations. *Neural Computation*, 1998
- Lee Te-Won, Lewicki M S, Girolami M. Blind Source Separation of More Sources Than Mixture Using Overcomplete Representations. *IEEE Signal Processing Letters*, 1999(4): 87~90
- Lewicki M S, Sejnowski T J. Learning nonlinear overcomplete representations for efficient coding
- Theis F J, Lang E W. Formalization of the Two-Step Approach to Overcomplete BSS
- Theis F J, Jung A, Puntonent C G, et al. Linear Geometric ICA: Fundamentals and Algorithms. *Neural Computation*, 2003, 15: 419~439
- Chen ShaoBing, Donoho D L, saunde M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit
- Huang Rong-Bo, Cheng Yiu-Ming, Zhu Shi-Ming. A parallel architecture using discrete wavelet transform for fast ICA implementation. In: *IEEE int Conf Neural Networks & Signal Processing Nanjing China*, 2003

(上接第 197 页)

- Theory, Implementation and Applications, chapter 15. Cambridge University Press, 2003
- Horrocks I, McGuinness D I, Welty C A. Digital Libraries and Web-Based Information Systems. In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*, Chapter 14. Cambridge University Press, 2003
- Borgida A, Lenzerini M, Rosati R. Description Logics for Data Bases. In: Baader F, McGuinness D, Nardi D, et al. eds. chapter 16. Cambridge University Press, 2003
- Lutz C. Reasoning with Complexity of terminological reasoning revisited. In: *Proc. of the 6th Intl Joint Conf. on Logic for Programming and Automated Reasoning (LPA'99)*, number 1705 in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, Step. 1999. 181~200
- Horrocks I, Sattler U, Tessaris S, et al. Query Containment using a DLR ABox; [LTCS-Report 00-15]. LuFG Theoretical Computer Science, RWTH Aachen, Germany
- Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. *The semantic web*. New York; Scientific American, 2001
- Naing Myo-Myo, Lim Ee-Peng, Dion Hoe-Lian Goh; Ontology-

- based Web Annotation Framework for HyperLink Structures. In: *WISE Workshops*, 2002. 184~193
- 邓志鸿,唐世渭,张铭,等. Ontology 研究综述. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(5)
- Horrocks I, Patel-Schneider P. The generation of DAML+OIL. In: *Proc of the 2001 Description Logic Workshop (DL 2001)*, CEUR (<http://ceur-ws.org/>), volume 49, 2001. 30~35
- DAML language home page (<http://www.daml.org/language/>)
- Horrocks I, Sattler U, Tobies S. Reasoning with individuals for the description logic shiq. In: *MacAllester D. ed. Proc of the 17th Conf on Automated Deduction (CADE-17)*, number 1831 in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 2000
- OIL home page <http://www.ontoknowledge.org/oil/>
- Straccia U. A Fuzzy Description Logic. In: *Proceedings of AAAI-98. 15th Conference of the American Association for Artificial Intelligence*
- Artale A, Franconi E, Milenko Mosurovic M, et al. *International Description Logics Workshop*, 2001, CEUP-WS Vol-49
- Wolter F, Zakharyashev M. Dynamic description logic. In: *Segerber K, de Rijke M, Wansing H, et al. eds. Advances in Modal Logic*. V CSLI Publications, 2000, 2