

# 时空推理前沿研究综述<sup>\*</sup>

王生生 刘大有

(吉林大学计算机科学与技术学院 符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春130012)

**摘要** 本文对时空推理及应用中若干前沿研究方向进行了综述和分析。概括了时空推理的概念和主要研究方向,总结了近10年来时空推理中时空代数、时空信息综合、时空粒度等理论方向及地理信息系统和时空数据库等应用方向的研究工作,分析了存在的问题并指出了发展趋势。

**关键词** 时空推理,时空代数,时空数据库,GIS

## Overview of Advanced Spatio-Temporal Reasoning Researches

WANG Sheng-Sheng LIU Da-You

(College of computer science and technology, Key laboratory of symbolic computing and knowledge engineering of ministry of education, Jilin University, Changchun 130012)

**Abstract** The advanced spatio-temporal reasoning researches are analysed and summarized. The major research aspects and basic conceptions are discussed. The theoretical works such as spatio-temporal algebra, integrating spatio-temporal information, spatio-temporal granularity et al. and the applied works such as Geographical Information System and spatio-temporal database are briefly introduced. The flaws of those work are pointed out. Finally the emerging trend is indicated.

**Keywords** Spatio-temporal reasoning, Spatio-temporal algebra, Spatio-temporal database, Geographical information system

## 1 引言

近年来,时空推理已成为十分活跃的研究领域,在规划、地理信息系统(GIS)、自治机器人高级导航、自然语言理解等方面都有着广泛的应用。时空推理涵盖了时空表示和建模等研究内容。时空推理由时态推理和空间推理发展而来。时态推理研究起源于20世纪50年代末,一直到现在从未间断过。从上世纪90年代初开始,空间推理已成为AI的主要研究方向之一。Lee和Cohn等都指出,尽管空间推理的概念被广泛使用,但很难对它给出广泛认同的定义。1991年,Egenhofer<sup>[1]</sup>指出空间推理是关于空间内的点和点集的推理。1997年,Takashi Matsuyama和Toshikazu Wada<sup>[2]</sup>指出空间推理是利用空间信息进行的推理,是图像理解和计算机视觉系统的一个重要功能。2000年,NCGIA指出空间推理是涉及空间对象位置的

推理,在GIS和机器人技术领域非常重要,并且已经被用于图像处理系统。本文针对几个热点研究方向,概括总结了10年来时空推理的部分前沿研究工作。

## 2 时空代数

逻辑方法和代数方法是主要的形式化知识表示方法,它们也是时空推理的主要方法。代数方法因为其理论体系严谨、运算和操作方便等在表示方面的优势,以及便于进行复合运算等推理方面的优点,而被众多的应用系统(如关系数据库管理系统)广泛使用。本节主要介绍时空代数方面的研究工作。

时空代数的代表性工作是Allen的时间区间代数<sup>[3]</sup>及其衍生理论(如Ladkin代数),其公理系统、复合表、推理、计算复杂性及应用等方面的研究都比较完善。此外,1991年McKenzie<sup>[4]</sup>,1996年Dey<sup>[5]</sup>,2003年Wijsen<sup>[6]</sup>等分别提出了面

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(No. 60373098);国家高技术研究发展计划项目(2003AA118020);吉林省自然科学基金项目(20030523);吉林大学创新基金项目(2002CX028)。王生生 讲师,博士,研究方向为定性空间推理,GIS。刘大有 教授,博士生导师,研究方向为知识工程和空间推理等。

路的可用性信息,减小开销。

## 参考文献

- 1 Werner M, et al. ATM-Based Routing in LEO/MEO Satellite Networks with Intersatellite Links. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(1)
- 2 Werner M. A Dynamic Routing Concept for ATM-Based Satellite Personal Communication Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(8)
- 3 Sturza M A. Architecture of the TELEDESIC satellite system. In: Proc. IMSC'95, Ottawa, Canada, June 1995. 212~218
- 4 Chang H S, et al. Topological Design and Routing for Low-Earth Orbit Satellite Networks. In: Proc. of IEEE GLOBECOM, 1995. 529~535
- 5 Gounder V V, Prakash R, Abu-Amara H. Routing in LEO-based satellite networks. In: Proc. of IEEE Emerging Technologies Symp. Wireless Communications and Systems, Apr. 1999
- 6 Hutcheson J, Laurin M. Network flexibility of the IRIDIUM global mobile satellite system. In: Proc. 4th IMSC, Ottawa, Canada, June 1995. 503~507
- 7 Pratt S R, et al. An Operational and Performance Overview of the IRIDIUM Low Earth Orbit Satellite System. *IEEE Communications Surveys*, 1999, 1(3): 2~10

向时态数据库的时态关系代数。

数学中对空间问题的研究最初是在定量领域,如欧氏几何、解析几何、射影几何和微分几何学。用代数方法研究空间问题,远远早于逻辑方法。19世纪末,法国数学家 Poincare 提出了代数拓扑学。代数拓扑学以空间中的点集为研究对象,研究具有拓扑结构的集合及其在拓扑变换下不变的性质,即所谓拓扑空间及其拓扑性质。上世纪90年代初,许多 AI 权威学者论证了数学点集拓扑理论虽然有较强的表示能力,但推理能力有限,甚至连传递关系这样最基本的推理问题也不能处理,不合作计算机建模。为此,Clarke 等人创立了区域拓扑理论。区域拓扑理论已经成为空间推理研究的主流,其中最著名的就是 RCC 理论。RCC 理论的基础是“部分”关系,它可追溯到 1915 年 Lesniewski 的部分学理论,随后 Leonard 和 Goodman 发展了该理论。1985 年,Clarke<sup>[7]</sup>基于经典部分学理论和 Whitehead 的“外延连接”关系,给出了个体连接演算的三条公理。Clarke 在试图增加新公理以支持“点”概念时导致了与部分学理论的冲突。1991 年,Biacino 和 Gerla<sup>[8]</sup>针对这一问题,提出了“连接”的新定义。1992 年,Randell 等人<sup>[9]</sup>以此为基础提出了基于一阶逻辑的空间知识表示 RCC 模型,该模型定义了八个基本谓词以表示空间对象间的基本拓扑关系。

1998 年,Duntsch<sup>[10]</sup>基于部分关系扩充了 RCC 关系运算,建立了 RCC 关系代数 BRA,并证明了 RCC 实际上是布尔代数。2000 年,Stell 也独立地给出了 RCC 是布尔代数的证明<sup>[11]</sup>。2001 年,Duntsch<sup>[12]</sup>在对 RCC 理论最大可表示区域分析的基础上,对 RCC 关系进一步求精,分别将 RCC-8 和 RCC-5 扩展成 RCC-10 和 RCC-7。Duntsch 还证明了 RCC 的密度公理是冗余的。

1996 年,Gotts<sup>[13]</sup>在证明 RCC 理论时使用了点集概念,从而引发了 RCC 是否为伪区域拓扑理论的争论。此外,点集拓扑能描述很多奇怪的形状,是否其表达能力又强于区域拓扑呢? 1998 年,Pratt 等人<sup>[14]</sup>针对以上疑点,论证了点集和区域拓扑在特定条件下是等价的,并且区域拓扑更符合空间的本质。2000 年,Stell<sup>[15]</sup>采用布尔连接代数 BCA,在不涉及点集(但不是排斥点集)的情况下证明了 RCC 理论。2003 年,李三江<sup>[16]</sup>对 RCC 理论进行了研究,指出 Bennett 关于 RCC 解释外延的假说是错误的,并讨论了 RCC 复合表中每个项的成立条件。以上工作是对 RCC 理论基础的完善和补充。

$n$ -交集模型是另一种重要的空间代数拓扑关系模型,它的提出早于 RCC 理论,其后续的研究工作主要集中于不确定性和模糊性方面。不同于 RCC 理论,它是基于点集理论的,其所描述的 8 种基本空间关系可以同 RCC-8 相对应。

定性空间推理领域还有一些空间关系代数研究工作。2001 年,Roy 等人<sup>[17]</sup>对表达不确定区域拓扑关系的著名“蛋黄模型(egg-yolk)”进行了泛化,构造了 Lukasiewicz 代数。2003 年,王生等<sup>[18]</sup>基于粗集理论提出了表达近似空间关系的代数 ASRA,并应用于地理信息系统的空间关系判定算法。

总的说来,RCC 理论和  $n$ -交集模型以外的空间关系代数研究工作还比较少,比较零散。在时空代数方面,虽然近 5 年来也有一些时空结合的代数方法出现,但与时空结合的逻辑方法相比还有相当的距离。1998 年,McQueen<sup>[19]</sup>借助传统的关系数据模型表达与时间和空间相关的信息,这些信息在形式上是文本或数字类型的表格,未涉及真正意义上的时空表示。

在实体的空间演化中实体本身可能会发生变化。早在 1957 年,McCarthy 就研究过这类实体变化问题,这也是目前

时空推理、GIS、时态数据库等研究的重点。一般用 identity 概念处理此类问题。Al-Taha 和 Barrera 指出了 identity 的三个标准:唯一性、永恒性和非重用性。Hornsby 和 Egenhofer 也研究过 identity 在 GIS 中的应用。1999 年,Medak<sup>[20]</sup>提出了一种能表达空间实体时空演化关系的代数方法,定义了 identity 的建立、消失、挂起和恢复等基本操作。这些操作既可用于表示单一实体的演变,也可用于表示一组实体的聚合、分离等变化。Medak 称之为 lifestyles 方法,用范畴论和数学方法对其进行了形式化表达,并用函数程序语言 Haskell 实现。

2000 年,Viqueira<sup>[21]</sup>扩展了他的量子(quantum)空间关系模型,构造了时空代数系统。Viqueira 的空间关系表示方法是把二维空间表示为迂回连续编码的点阵,空间点用数字表示,线和区域由其边界点表达。时空关系的表达采用快照方式,即给出各时间点处的空间状态。Viqueira 定义了一些基本时空操作,并证明了其封闭性。Viqueira 的时空模型能对常规、时间、空间和时空数据进行处理,可应用于关系数据库和 SQL,但它所能表达的时空对象仅局限在有限点阵中。

2000 年,Claramunt<sup>[22]</sup>扩展了 Ladkin 代数,通过空间副词来表达由简单区域构成的非凸区域,结合时态副词来表达区域的演变,用于常识推理中对复杂空间轮廓的分析。2001 年,Claramunt 等人<sup>[23]</sup>将不考虑方向的区间代数和 RCC-8 拓扑关系组合在一起形成 56 种基本时空关系。

时空关系代数的研究刚刚起步,该领域目前存在的问题主要有:第一、缺乏理论基础。一般只给出了时空关系的名称和描述,缺乏公理系统和形式化推导,也没有提供关系复合表和推理策略。很多工作仅针对时空数据库查询;第二、只针对特定环境,不能表达更一般的时空变化。Frank、Medak 和 Egenhofer 等将实体的时空变化分为 life 和 motion 两类,分别对实体的演化(实体的生命期 LifeSpan)和运动(实体位置变化)建模。在现实世界的时空变化中,life 和 motion 是同时发生的。但以上列举的时空关系代数系统都仅面向 life 建模。结合 life 和 motion 的研究工作在时空关系代数乃至其它时空研究领域还很少;第三、时空关系应该将时态和空间放在等同的地位。但除了文[23]首次提出了支持时态区间和空间区域的时空关系代数之外,大多数工作还是从空间区域关系随时间的变化入手,来展开时空关系研究的。

综上所述,一个完善的时空关系代数应该具有完备的理论基础,能表达 life 和 motion 时空关系,并能支持时态关系和空间关系。到目前为止,还未出现能同 Duntsch 和 Stell 等人的空间代数理论相提并论的时空代数理论。

### 3 多种空间关系的表示和综合

前面所涉及的空间关系主要是拓扑关系,时空推理研究的其他空间关系还包括:方向、距离、尺寸、形状等。单一的空间关系的研究已取得了较大进展。理论上时空结合应包括所有的时间和空间方面,但目前的大多数研究工作还仅局限于时间区间关系和空间拓扑关系,这是前一节主要讨论的内容。不仅如此,即使在单纯空间问题的研究中,多种空间关系的综合表示和推理研究也还存在很多未解决的问题。本节将首先介绍一些单一空间关系的研究工作,而后介绍综合这些空间关系的方法。

#### 3.1 单一空间关系

除了 RCC 理论和  $n$ -交集模型之外,还有一些不太常见的拓扑关系模型。1990 年,Lee 等人<sup>[24]</sup>提出了 2D-string 拓扑关

系,其基本思想是把二维空间中的两个区域向坐标轴投影,用2个字符串分别表示它们在2个坐标轴方向上的交叠关系。2D-string方法表示简单、实用,已用于基于内容的图像检索、图像序列管理、时空系统等领域。2002年,Anthony等人<sup>[25]</sup>将2D-string扩展为能表示视频对象的时空关系和运动轨迹的3D-strings,用于对视频数据库的分析、检索和可视化。

1998年,Coenen等人<sup>[26]</sup>提出了基于四叉树网格的空间表示和推理系统。该方法采用四叉树编码把空间划分为单元格,并对其线性编码。把二维的空间对象用一维数组表示,并提供了拓扑关系的推理方法。二维空间问题化简为一维线性空间问题降低了计算复杂性,在GIS系统中很有实用价值。

其它的拓扑模型还很多,比如基于单纯形理论的定性拓扑建模,对于二维空间就是建立全平面的三角剖分。值得注意的是,尽管RCC等模型的定义并不局限在二维空间,但它们在三维空间的描述能力并不强。因此,很多三维空间的拓扑模型被提出,并应用于机器人技术中。

方向关系描述了一个对象相对于另一个(或几个)对象的关系。可用3个基本概念定义方向关系:主对象PO、参照对象RO和参考系FofR。由于参考系的不同方向关系有很多种表示方法,可以分为基于投影的和非基于投影的两类<sup>[27~29]</sup>。基于投影的方向关系模型包括:1989年Guesgen直接扩展了Allen的区间代数,在二维坐标轴上直接使用时态区间关系,提出了正交投影模型。1990年Mukerjee等人以主对象为中心建立参考系,提出了具有内在前方概念的方向模型,并给出了传递推理方法。非基于投影的方向关系模型包括:1992年Freksa等人提出了基于运动的参考系模型,其特点是参照对象是运动物体的两个位置,由此定义了15种相对于该运动物体的方向关系,在机器人导航中有广泛应用。1992年Frank提出了采用等分角(将对象视为点)或边界延长线(将对象视为矩形)划分空间的基数参考系,并应用于GIS。1993年,Schliede对点3元组定义了定性值{-,0,+},分别表示逆时针、顺时针和直行方向。1994年,Rohrig提出了三元方向算子CYCORD( $x,y,z$ ),该方向算子为真当且仅当2D点 $x,y,z$ 是顺时针关系。1998年,Isli等人通过约束逻辑程序建立了基于CYCORD的推理系统。CYCORD中使用了3元关系代数,定义了24种循环2D方向关系原子,可以导出 $2^4$ 种方向关系,其推理是NP问题。2000年,Cohn等人用循环序(cyclic ordering)三元关系代数表达二维方向关系,并研究了其约束传播算法及复杂性。

对距离的表示可以分为“绝对”尺度空间中的度量距离和相对距离两类<sup>[27~29]</sup>。定性推理(qualitative reasoning简称QR)中的定性代数很自然地引入到度量距离的建模中。在时空推理领域中,相对距离的研究较多。最早引入的算子是CanConnect( $x,y,z$ )表示 $x$ 仅通过平移(无旋转,形变,缩放)就能够同时连接到 $y$ 和 $z$ 上。

距离和方向是相关的,不同方向上的距离无法直接进行比较,点到区域的距离也同方向相关,因此很多研究工作同时考虑距离和方向。1992年, Frank提出了一种比较简单的方法,先将空间划分为表示方向的扇形区域,然后再用表示定性距离(如远、近等)的同心圆进一步分割。1993年,Zimmermann提出了一种根据两点间的连线确定第三点位置的较为复杂的方法。1993年,Zimmermann用Delta算子把定性方向和距离概念结合起来。1998年,Liu定义了定性距离和定性方向,提出了定性三角理论,构造了复合表,应用于基于模拟退火算法

的定性视觉处理。

形状是对象最重要的性质,也最难定性描述。基于RCC理论能实现对区域形状进行部分描述,如是否有洞、是否是多块的等,但很难对形状进行严格的限制。如果要求更精确的划分,仅使用拓扑、方向和距离是很不够的,应该使用定性表示抽取基本形状要素<sup>[27~29]</sup>。1993年,Junger提出了一种用于描述多边形形状的斜投影技术,通过对每个角区分{凸,凹}、{锐角,直角,钝角}和{9种角的方向},实现对多边形的定性描述,也支持用可描述简单对象构造复杂对象。

### 3.2 综合空间关系

拓扑、方向、距离等各种空间关系从不同角度刻画了空间实体间的关系,所有类型的空间关系在本质上应该是统一的。在实际应用(比如GIS的空间查询)中,综合考虑多种空间关系的情况十分普遍。

2002年,Alfonso<sup>[30]</sup>研究了结合拓扑和尺寸信息的空间表示和推理方法。他采用了RCC拓扑关系理论。从RCC-8中去掉PO后得到RCC-7,指出RCC-7也是NP完全的。对尺寸给出了定性和度量两种描述,并分别同拓扑关系相结合。Alfonso原工作从“计算”而不是“表示”的角度研究多种空间关系的综合问题。尺寸和拓扑两个原本已研究得比较透彻的空间关系,将它们结合在一起就会产生如此多的新问题。不仅空间关系分为多种类型,对时间的建模方式和角度也多种多样。将这些时态和空间关系中的部分甚至全部结合起来,是一项非常艰苦又十分有意义的工作,也是时空推理的研究重点和热点之一。

**结论** 时空推理是人工智能以及地理信息系统、时空数据库等相关领域的热点研究方向。在基础理论方面,对时间或空间信息表示和推理的理论研究工作比较充分,对时空结合信息处理的研究才刚刚起步,时间和空间相结合的研究工作还存在很多问题。为构造适应性更强的时空结合理论很可能需要摒弃原来针对单纯时间和空间的建模方法,从根本上提出一套面向时空统一的新理论。现在的时空结合工作多数限于拓扑关系和时间区间关系的结合,还需要进一步深入研究多种空间和时间关系的结合,最终建立所有空间和时间关系的统一建模。随着移动定位技术和时空信息处理理论的快速发展,时空推理正在成为人工智能乃至其他相关学科中异常活跃的研究领域,时空推理研究工作的深入展开必将会促进人工智能乃至整个计算机科学的发展。

### 参考文献

- 1 Egenhofer M J, Franzosa R. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991,5: 161~174
- 2 Matsuyama T, Wada T. Cooperative Spatial Reasoning for Image Understanding. *International Journal of pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1997,11(1):205~227
- 3 Allen J. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 1983(26): 832~843
- 4 McKenzie L E Jr, Snodgrass R T. Evaluation of relational algebras incorporating the time dimension in databases. *ACM Computing Surveys*, 1991,23(4): 501~543
- 5 Dey D, Barron T M, Storey V C. A complete temporal relational algebra. *VLDB Journal: Very Large Data Bases*, 1996,5(3): 167~180
- 6 Wijsen J, Alexis B. On query optimization in a temporal SPC alge-

- bra. *Data & Knowledge Engineering*, 2003, 44:165~192
- 7 Clarke B L. Individuals and points. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 1985, 26(1): 61~75
  - 8 Biacino L, Gerla G. Connection structures. *Notre Dame J. Formal Logic*, 1991, 32:242~247
  - 9 Randell D, Cui Z, Cohn A. A spatial logic based on regions and connection. In: *Proc. of the 3rd Intl. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*, Morgan Kaufmann, 1992. 165~176
  - 10 Duntsch I, Wang H, McCloskey S. Relation algebras in spatial reasoning. In: E. Or lowska, A. Szatas, eds. *Extended Abstracts of the 4th Seminar on Relational Methods in Algebra, Logic, and Computer Science*, 1998. 63~68
  - 11 Stell J G. Boolean connection algebras: A new approach to the Region-Connection Calculus. *Artificial Intelligence*, 2000, 122:111~136
  - 12 Duntsch I, Wang H, McCloskey S. A relation algebraic approach to the region connection calculus. *Theoretical Computer Science*, 2001, 255:63~83
  - 13 Gotts N M. An axiomatic approach to topology for spatial information systems: [Research Report 96. 25]. University of Leeds, School of Computer Studies, 1996
  - 14 Pratt I, Lemon O. Ontologies for plane, polygonal mereotopology. *Notre Dame J. Formal Logic*, 1998, 38:225~245
  - 15 Li Sanjiang, Ying Mingsheng. Region Connection Calculus: Its models and composition table. *Artificial Intelligence*, 2003, 145: 121~146
  - 16 Roy A J, Stell J G. Spatial relations between indeterminate regions. I. *J. of Approximate Reasoning*, 2001, 27:205~234
  - 17 王生生, 刘大有, 胡鹤. 近似空间关系代数 ASRA 及应用. *中国图像图形学报*, 2003(8): 946~950
  - 18 McQueen M, Mann S. A Relational Algebra Approach to Problems of Spatio-temporal Representation. In: *Proc. of the Spatial Information Research Centre's 10th Colloquium*. 1998. 219~228
  - 19 Medak D. Lifestyles - an algebraic approach to change in identity. In: Bohlen MH, Jensen C, Scholl M, eds. *Spatio-temporal database management*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1999. 19~38
  - 20 Viqueira J R R. Relational algebra for Spatio-temporal data management. *EDBT PhD Workshop 2000*
  - 21 Claramunt C. Extending Ladkin's Algebra on Non-convex Intervals towards an Algebra on Union-of Regions. In: *8th ACM Symposium on GIS*, 2000. 9~14
  - 22 Claramunt C, Jiang Bin. An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions. *J Geograph Syst*, 2001, 3:411~428
  - 23 Lee S Y, Hsu F J. 2D C-string: a new spatial knowledge representation for image database system. *Pattern Recognition*, 1990, 23:1077~1087
  - 24 Lee A J T, Chiu H-P, Yu P. 3D C-string: a new spatio-temporal knowledge representation for video database systems. *Pattern Recognition*, 2002, 35:2521~2537
  - 25 Coenen F P, Visser P. A General Ontology for Spatial Reasoning. In: Miles, R., Moulton, M., Bramer, M, eds. *Research and Development in Expert Systems XV*, proc. of ES'98, Springer, London, 1998. 44~57
  - 26 Stock O. *Spatial and Temporal Reasoning*. Kluwer Academic Publishers, 1997
  - 27 Escrig M T, Toledo F. *Qualitative Spatial Reasoning: Theory and Practice [M]*. Ohmsha published, 1999
  - 28 Cohn A G, Hazarika S M. *Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview*. *Fundamental Informatics*, 2001, 46(1-2):1~29
  - 29 Gerevini A, Renz J. Combining topological and size information for spatial reasoning. *Artificial Intelligence*, 2002, 137:1~42

(上接第5页)

法。在已有的知识本体集成方法中,还没有方法注意到在集成过程中知识本体一致性的问题。本文提出的集成方法将知识本体转换为一阶谓词表示形式,利用一阶谓词逻辑来检测知识本体之间的一致性,这样保证了集成知识本体的一致性。同时这一方法也可以使用工具自动或者半自动地完成这一集成过程。

由于 WWW 具有分布性、异质性、开放性等特点,在其中会存在各种不同表示形式的知识本体。通过将多种表示形式的知识本体映射转换到一阶谓词逻辑,我们可以实现多种知识本体之间的集成。今后的工作将重点集中于如何扩展本方法,使之能支持更多表示形式的知识本体集成,以扩展本集成方法的应用范围。

### 参 考 文 献

- 1 Smith B, Welty C. *Ontology: Towards a New Synthesis*, *Formal Ontology and Information Systems*. New York: ACM Press, 2001
- 2 Wiederhold G. An Algebra for Ontology Composition. In: *Proc. of 1994 Monterey Workshop on Formal Methods*, U.S. Naval Postgraduate School, 1994
- 3 Hefin J, Hendler J. Dynamic Ontologies on the Web. In: *Proc. of 17th National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-2000)*, 2000
- 4 Farquhar A, Fikes R, Rice J. Tools For Assembling Modular Ontologies in Ontolingua. In: *Proc. of 14th National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-97)*, Menlo Park, CA: AAAI Press, 1997
- 5 Gruber T. Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies, version 3.0. [Technical report]. Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, California, 1992
- 6 Decker S. On Domain-Specific Declarative Knowledge Representation and Database Languages. In: *Proc. of the 5th Knowledge Representation Meets Databases Workshop (KRDB98)*, 1998
- 7 Luke S, Spector L, Rager D, Hendler J. Ontology-based Web Agents. In: *Proc. of the First Intl. Conf. on Autonomous Agents*, New York, NY: Association of Computing Machinery, 1997
- 8 Staab S, Erdmann M, Maedche A, Decker S. An Extensible Approach for Modeling Ontologies in RDF(S). In: *Workshop on Semantic Web Associated to ECDL'2000*, 2000
- 9 Fensel D, Decker S, Erdmann M, Studer R. Ontobroker: Or How to Enable Intelligent Access to the WWW. In: *Proc. of 11th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based System Workshop (KAW98)*, Banff, Canada, 1998
- 10 Blazquez M, Fernandez M, Garcia-Pinar J M, Gomez-Perez A. Building ontologies at the knowledge level using the ontology design environment. In: *Proc. of the 11th Intl. Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management (KAW'98)*, Banff, Canada, 1998
- 11 Gruber R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(1)