

方位关系约束满足问题的推理求解<sup>\*</sup>)

郭平 侯睿 杨国洲 范丽  
(重庆大学计算机学院 重庆 400044)

**摘要** 约束满足问题(Constraint Satisfaction Problems CSP)是人工智能的一个研究领域,诸如空间查找、规划等问题都可转化为约束满足问题。方位关系是空间关系的重要组成部分,用以确定空间对象间的一种顺序。本文研究了空间方位关系模型,给出了方位关系约束的一般表示形式。在此基础上,利用组合表推理给出了方位关系约束满足问题的一个推理求解算法,该算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ 。

**关键词** 约束满足问题,方位关系,定性空间推理,组合表

## Reasoning Method for Resolving Orientation Relation Constraint Satisfaction Problems

GUO Ping HOU Rui YANG Guo-Zhou FAN Li

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** Constraint Satisfaction Problems (CSP) is a research domain of artificial intelligence. For example, spatial query, planning can be transformed into CSP. Orientation relation is important part of spatial relation, used to confirm the sequence between spatial objects. This paper has a research on the model of spatial orientation relation, and gives a general representation form about orientation relation constraint. Based on this, a reasoning algorithm to orientation relation constraint satisfaction problems is represented by using combinative table reasoning. The time complex of the algorithm is  $O(n^2)$ .

**Keywords** Constraint satisfaction problems, Orientation relation, Qualitative spatial reasoning, Combinative table

空间关系指空间对象之间具有空间特性的关系,通常分为三大类<sup>[1]</sup>,即度量关系、顺序关系和拓扑关系。度量关系是用某种度量空间中的度量来描述的对象间的关系,如对象间的距离等;顺序空间关系是用来描述对象在空间中的某种顺序的关系,如前后、上下、左右、东西南北等;拓扑空间关系是指拓扑变换下的拓扑不变量,如空间对象的相邻和连通关系。Engenhofer 和 Hering<sup>[2]</sup>提出了一种数学框架用于定义拓扑关系, Papadias 和 Sellis<sup>[3]</sup>利用表示点定义方位关系, Kainz<sup>[4]</sup>等人利用部分顺序集为顺序关系建模, Frank<sup>[5]</sup>提出一种将方位关系和距离关系结合进行定性推理的方法。

方向关系作为一类重要的空间定性关系,在空间分析、查询以及空间归还等领域都有许多的应用。这些应用中的大部分可以转换为方位关系约束满足问题。约束满足问题的求解已有许多方法,如约束增值、约束松弛、结构化约束松弛等<sup>[8~10]</sup>。文[7]给出了空间拓扑关系约束满足问题的推理求解方法。

本文在文[7]的基础上,研究了空间方位关系约束满足问题的求解,给出了基于组合表推理的算法,可以证明该算法的时间复杂度为  $O(n^2)$ 。

## 1 空间方位关系与约束满足问题

方位关系是一类重要的空间关系,它是空间对象间方向关系的一种抽象。一般地,我们将方向关系作为定量描述方法,而将方位关系作为定性描述方法。1976年 Haar 提出了空间方位表示的锥形模型(cone model),它以参考对象的质心为原点,用两条相互垂直的线将  $R^2$  空间划分为四个无限的锥形区域,每个锥形的角平分线分别是东、南、西、北四个主方向。目标对象落在锥形区域的主方向就是目标对象相对于参考对象的方位。

在基本的锥形模型基础上, Peuquet D. 等通过引入参考

对象的最小边界矩形 MBR(Minimum Boundary Rectangle)和朝向侧的概念,改进了锥形模型,使其能够判断一些较复杂对象间的关系。另一类改进是增加主方向的数目,使能够判定出更复杂的方位关系。锥形模型的优点是能够方便地调整主方向的数目。

将对象投影到坐标轴上并比较投影坐标值的大小来确定对象间的方位关系是一种常用的方位关系模型,称为基本投影模型。选择不同的投影坐标轴将得到不同的投影模型。图1给出了三种投影模型,分别称为垂直投影模型、水平投影模型和垂直-水平投影模型。其中  $O$  为参考对象的投影位置。当目标对象的投影位置也为  $O$  时,两个对象间的方位关系称为同位(SA)。

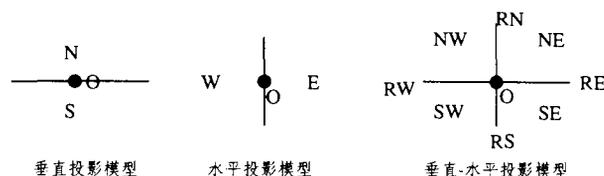


图1 三种基本投影模型

基本模型能够较好地表示空间点对象间的方位关系。例如,任意两个点对象  $A, B$ , 它们在垂直投影下  $Y$  坐标分别记为  $A_y, B_y$ , 有:

$$dir(A, B) = \begin{cases} N & \text{当 } A_y < B_y \\ S & \text{当 } A_y > B_y \\ SA & \text{当 } A_y = B_y \end{cases}$$

当参考对象不是点对象时,以参考对象的最小边界矩形 MBR 来近似表示它,并作垂直-水平投影,得到井字空间投影模型(简称井字空间模型,或井字空间),如图2,其中 SA 表示

<sup>\*</sup>)国家自然科学基金项目(编号:50378093)。郭平 副教授,主研方向:AI、GIS技术;侯睿 硕士研究生,主研方向:GIS技术。

同位方位关系。特别地,把垂直-水平投影模型认为是参考对象为点对象时的井字空间模型。

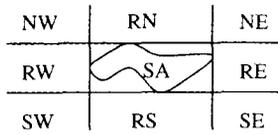


图2 井字空间投影模型

井字空间投影模型将  $R^2$  划分为9个区域,每个区域的主方向依次规定为 RN, NE, RE, SE, RS, SW, RW, NW, SA, 称为井字空间的强方位关系。然而,这9个强方位与人类认知中的方位关系有差异,如在人类对方位认知中还包括东、南、西、北等方位关系。为此,扩展强方位关系获得如下的13种方位关系:

$$D = \{RN, NE, RE, SE, RS, SW, RW, NW, SA, N, E, S, W\}$$

其中:

$$N \equiv_{def} (NW \wedge RN) \vee (RN \wedge NE) \vee (NW \wedge RN \wedge NE)$$

$$E \equiv_{def} (NE \wedge RE) \vee (RE \wedge SE) \vee (NE \wedge RE \wedge SE)$$

$$S \equiv_{def} (SW \wedge RS) \vee (RS \wedge SE) \vee (SW \wedge RS \wedge SE)$$

$$W \equiv_{def} (NW \wedge RW) \vee (RW \wedge SW) \vee (NW \wedge RW \wedge SW)$$

这里,我们将方位关系看作了空间方位谓词( $R \in D$ ):

$$R(x, y) = \begin{cases} T & \text{如果空间对象 } x \text{ 与 } y \text{ 间有方位关系 } R \\ F & \text{如果空间对象 } x \text{ 与 } y \text{ 间无方位关系 } R \end{cases}$$

井字空间投影模型是一种广泛使用的方位关系表示模型,以下关于方位关系的讨论均是基于这个模型。

利用空间方位谓词,空间对象间的方位关系约束可以表示为:设有空间对象集合  $O = \{O_i\}, 1 \leq i \leq n$ ,用  $R_i(O_{j_1}, O_{j_2})$  记  $O_{j_1}$  与  $O_{j_2}$  间的方位关系,  $1 \leq j_1 < j_2 \leq m, R_i \in D$ 。称

$$\bigwedge_{j=1}^m R_j(O_{j_1}, O_{j_2}) = T \quad (1)$$

为空间方位关系约束满足问题的一般形式。

(1)式有解,或称为是相容的,如果存在  $R'_j \in D, 1 \leq j \leq m$ ,使得(1)式成立。 $R'_1, \dots, R'_m$  称为(1)式的解。特别地,如果(1)式无解,我们将在  $D$  中求出一组近似解: $R'_1, \dots, R'_m$ , 使:

$$\bigwedge_{j=1}^m R'_j(O_{j_1}, O_{j_2}) = T$$

并且使  $\{R_j\}$  与  $\{R'_j\}$  尽量相似。在图3中,有弧线相连的两个关系被称为是相似的。

## 2 方位关系的约束松弛、增值与邻居

在方位关系集  $D$  中,我们将13种关系分为两个部分:

强方位关系集  $D' = \{RN, NE, RE, SE, RS, SW, RW, NW, SA\}$

弱方位关系集  $D'' = \{N, E, S, W\}$

显然:  $D = D' \cup D''$ 。

就两个对象间的方位关系而言,强方位关系比弱方位关系更有意义,因此,我们的目标是尽量找出对象间的强方位关系。我们称将强方位关系转换为弱方位关系为方位关系约束松弛,反之,由弱方位关系转换为强方位关系称为约束增值。

约束松弛指的是如下方位关系代换:

$$N \leftarrow \{NW, RN, NE\}$$

$$E \leftarrow \{NE, RE, SE\}$$

$$S \leftarrow \{SE, RS, SW\}$$

$$W \leftarrow \{SW, RW, NW\}$$

其中,  $N \leftarrow \{NW, RN, NE\}$  指用  $N$  来代替  $\{NW, RN, NE\}$  中的任何一个关系,余类似。

约束增值指的是如下方位关系代换:

$$RN \leftarrow N$$

$$RE \leftarrow E$$

$$RS \leftarrow S$$

$$RW \leftarrow W$$

其中,  $RN \leftarrow N$  指用  $RN$  来代替  $N$ ,余类似。

图3中,用箭头所指的方位关系代替箭尾的方位关系图示了方位关系的松弛与增值。

$D$  中方位间的邻居关系在图3中指的是用弧线相连的关系。例如,  $RW$  与  $SW$  间有弧线相连,  $RW$  与  $SW$  是邻居;  $SW$  与  $RS$  有弧线相连,  $SW$  与  $RS$  是邻居。

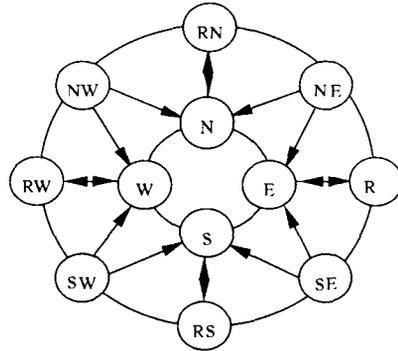


图3 方位关系的松弛、增值与邻居

## 3 方位关系定性推理

记空间对象  $x$  与  $y$  的方位关系为  $R_1(x, y)$ ,  $y$  与  $z$  间的方位关系为  $R_2(y, z)$ 。  $x$  与  $z$  间的方位关系记为:

$$R_3(x, z) = R_1(x, y) \circ R_2(y, z) \quad (2)$$

其中:  $\circ$  称为组合运算。当  $R_1, R_2 \in D$ , 由(2)式可获得组合表,利用组合表可以进行方位关系的推理<sup>[6]</sup>。

## 4 约束满足问题的推理求解算法

方位关系约束满足问题的求解目标是在  $D$  中找出(1)式的解或近似解。求解的思路是:

(1)判断(1)式是否有解;

(2)若(1)式有解,获得该解,若无解,则通过约束的松弛或增值求出其相似解。

推理求解的过程是在图3中进行松弛、增值及邻居替换。

由此,获得方位关系约束满足问题的求解算法如下:

算法:DCSP; //方位关系约束满足问题推理求解算法

输入:(1)式中空间对象集合  $O = \{O_i\}$  和空间关系集合  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ , 方位关系集  $D$ ;

输出:(1)的解或近似解集合  $R$

步骤:

(1) //约简约束满足问题

if  $\exists R_i$  与  $R_j \in R$  and  $R_i$  与  $R_j$  是关于相同对象  $O_1, O_2$  的约束 then

{ 计算:  $r \leftarrow R_i \cap R_j$ ; //如果  $R_i$  与  $R_j$  都  $O_1$  相对  $O_2$  的方位关系  $R_j$  为  $R_i$ , 否则为  $R_i$  的逆关系,以下类似的标志其含义相同

if  $r \neq \emptyset$  then  $R_i \leftarrow r$ , 并删除约束  $R_j$ ;

else

{ if  $R_i$  可以松弛 then 将  $R_i$  松弛后放回  $R$ , 仍记为  $R_i$ , 返回(2);

else if  $R_j$  可以松弛 then 将  $R_j$  松弛后放回  $R$ , 仍记为  $R_j$ , 返回(2);

else 从  $R$  中删除  $R_i$  与  $R_j$  中任意一个约束,如  $R_j$ ;

- (2)构造基于 R 的空间方位关系约束图
- 1)生成图 G,空间对象集合 O 中的对象为 G 中的顶点;
  - 2)对 R 中的任一关系  $R_i(O_{i1}, O_{i2})$ , 连接 G 中的顶点  $O_{i1}$  与  $O_{i2}$  形成一条边, 记为  $R_i$ ;
  - (3)删除 G 中不在任何环上的顶点和边, 约简图 G;
  - (4)//松弛约束以获得约束满足问题的解  
if G 中存在不相容的环  $C=R_{c1}R_{c2}\dots R_{ck}$  then {  
     $r \leftarrow R_{c1} \circ R_{c2}$ ;  
    for  $i = 3$  to  $k-1$  do  $r \leftarrow r \circ R_{ci}$ ;  
    if  $r \cap R_{ck} \neq \emptyset$  then  $R_{ck} \leftarrow r \cap R_{ck}$ ;  
    else  
        { 松弛  $R_{ck}$ , 记为  $R'_{ck}$ ;  
          if  $r \cap R'_{ck} \neq \emptyset$  then  $R_{ck} \leftarrow r \cap R'_{ck}$ ;  
          else  $R_{c1} \leftarrow r$ ;  
        }  
    }  
}
  - (5)//增值约束以获得约束满足问题的解  
for  $\forall R_k \in R \& R_k \in D'$  do {  
    if  $R_k$  不在任一环上 then 直接将  $R_k$  增值为  $D'$  中的约束, 用增值后的约束替换  $R_k$ ;  
    else  
        { 将  $R_k$  增值为  $D'$  中的约束;  
          if  $R_k$  所在的环相容 then 用增值后的约束替换  $R_k$ ;  
          else  
            { 用  $R_k$  的邻居替换  $R_k$ ;  
              if  $R_k$  所在的环相容 then 用增值后的约束替换  $R_k$ ;  
              else 撤消替换和增值;  
            }  
        }  
    }  
}
  - (6)return R;

算法 DCSP 中引入空间方位关系约束图的目的是简化约束相容性判断。在文[7]已证明如果空间关系约束图中所有环对应的关系相容, 那么空间关系约束图对应的空间关系约束满足问题相容。由此, 获得了算法 DCSP 的正确性证明。另一方面, 基于组合表推理来判定约束满足问题相容性的时间复杂度为  $O(n^2)$  [7]。

### 5 例子

下面的例子说明了算法 DCSP 的应用。

有一小区进行规划时提出的要求是: 商业区建在工矿区的西北; 居住区在商业区的正北; 小区的水源在居住区的东边; 学校在生活区的正西; 运动场馆在商业区的西边, 工矿区的北边。

将规划中的各功能区看作空间对象时, 规划的要求即是要判断各空间对象间的方位关系约束是否相容, 如果不相容需要给出一个与原规划尽可能接近的规划。这类问题利用 DCSP 算法能够很好地解决。首先, 将问题描述为空间对象方位关系约束问题:

$NW(\text{商业区}, \text{工矿区}) \wedge RN(\text{居住区}, \text{商业区}) \wedge W(\text{居住区}, \text{水源}) \wedge RW(\text{学校}, \text{生活区}) \wedge W(\text{运动场馆}, \text{商业区}) \wedge N(\text{运动场馆}, \text{工矿区})$  (3)

由于在(3)式中不存在两个对象间有不同的方位关系, 因此算法 DCSP 的第 1 步不需要做处理。按 DCSP 算法的第 2 步, 构造方位关系约束图, 如图 4 所示。

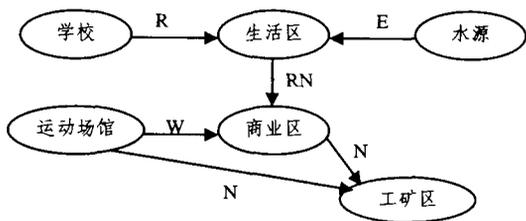


图 4 小区规划的方位关系约束图

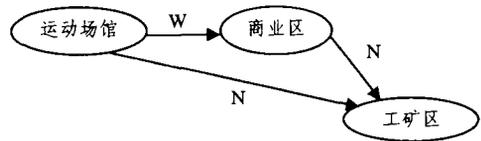


图 5 小区规划的方位关系约束图

删除图 4 中不在任何环上的顶点和边以后, 得到图 5。算法 DCSP 第 4 步的处理针对图 5 进行。

由于:

$W(\text{运动场馆}, \text{商业区}) \circ NW(\text{商业区}, \text{工矿区}) = \{NW, W\}(\text{运动场馆}, \text{工矿区})$

和

$$(NW, W) \cap \{N\} = \emptyset$$

松弛规划中运动场馆与工矿区之间的关系为  $\{NW, RN, NE\}$ , 由此修改运动场馆与工矿区之间的关系为  $NW$ , 可使环“运动场馆-商业区-工矿区”上的所有关系相容。

算法 DCSP 第 4 步的执行结果如图 6 所示, 第 5 步处理针对图 6 进行。

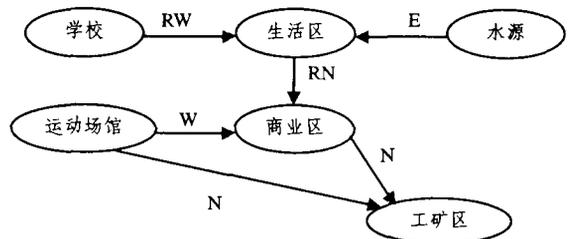


图 6 小区规划的方位关系约束图

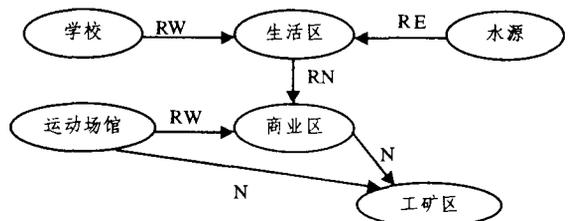


图 7 小区规划的方位关系约束图

将首先增值约束:  $W(\text{运动场馆}, \text{商业区})$  为:  $RW(\text{运动场馆}, \text{商业区})$ , 又由于:

$RW(\text{运动场馆}, \text{商业区}) \circ NW(\text{商业区}, \text{工矿区}) = NW(\text{运动场馆}, \text{工矿区})$

因此约束增值后环“运动场馆-商业区-工矿区”上的约束仍相容。

由于  $E(\text{水源}, \text{生活区})$  不在任何环上, 其约束的增值不影响约束满足问题的相容性, 将约束增值为  $RE$ 。最后可得规划问题的解, 如图 7 所示。

**结束语** 空间方位关系研究包括方位关系模型、计算、推理及应用等多个方面。就人工智能来说, 方位关系研究属于常识知识的表示与应用, 这是知识工程研究的难点。本文通过方位关系的投影模型建立了方位关系的表示方法, 然后将空间对象的方位关系抽象为方位关系的约束满足问题, 并提供了约束满足问题的推理求解算法, 可以证明该算法的时间

(下转第 181 页)

Step6:考察 Snumber 和 Rnumber,若超过某一个阈值,就可认为是网络机器人。这个阈值可根据网站的具体情况确定,例如,会话的个数为 2,访问的记录总数阈值可设定为 5 等等。

#### 4 实验结果分析

我们选取我校的 Web 服务器(202.192.168.145)2004 年 1 月 21 日至 2 月 7 日的访问日志作为实验对象。日志中访问记录的总数为 50740 条;来自不同的 IP 和 agent,访问 robots.txt 的记录数为 24 个。使用本文的算法,以 T=20 分钟作为分割的时间间隔,得到会话总数为 7432 个;得到的网络机器人候选集 C 的会话总数为 6724 个,其中,网页类会话 424 个,图片类会话 128 个,音乐类会话 6165 个,动画类会话 7 个。由于音乐类访问的记录形成比较复杂(例如,Windows Media Player 对一个 MP3 文件的访问可能会产生多条记录,并且其 agent 有时也不同),本文暂不对音乐类会话进行处理,因此实际用于进一步处理的网络机器人候选集 C 包括了网页类、图片类、动画类会话共 559 个。最后得到的合并会话集 M 共有 253 个项目。这 253 个项目平均的会话数为 2.2,最大会话数为 96,最小会话数为 1;平均访问记录数为 5.1,最大访问记录数为 249,最小访问记录数为 1。

表 2 检测得到的未访问 robots.txt 的 IP 以及 agent

IP	agent	访问类型
210.72.21.199	HTML-GET-APP	网页类
216.88.158.142	Mozilla/4.0+compatible+ZyBorg/1.0+(wn.zyborg@looksmart.net;+http://www.WISEnutbot.com)	网页类
66.196.72.103	Mozilla/5.0+(Slurp/cat;+slurp@inktomi.com;+http://www.inktomi.com/slurp.html)	网页类
66.196.90.125	Mozilla/5.0+(Slurp/cat;+slurp@inktomi.com;+http://www.inktomi.com/slurp.html)	网页类
202.96.63.3	User-Agent;+Mozilla/4.0+(compatible;+MSIE+5.5;+Windows+NT+5.0)	网页类
219.133.39.15	-	图片类
205.188.209.37	Mozilla/4.0+(compatible;+MSIE+6.0;+AOL+9.0;+Windows+NT+5.1)	网页类
66.237.60.91	Openfind+data+gatherer,+Openbot/3.0+(robot+response@openfind.com.tw;+http://www.openfind.com.tw/robot.html)	网页类

(1)检测的查全率 在原始日志中,访问了 robots.txt 的不同 IP+agent 共有 24 个。其中,有 20 个出现在最后得到的合并会话集 M 中。其他未出现的 4 个,通过核对原始数据,

发现它们仅仅访问了 robots.txt 却没有访问任何其他的内容,故自然不会出现在网络机器人候选集中。故本方法对于遵守规则的网络机器人的查全率达到 100%。

(2)检测的查准率 合并会话集 M 中 253 个项目到底哪些是真正的网络机器人? 判别的方法是考察其会话的个数和访问记录的总数。基于下面的假设:1)一个网络机器人访问网站时会产生比较多的用户会话(一般一个访问任务会分解成多次有一定时间间隔的请求);2)访问比较多的内容,我们从 M 中筛选出会话数 Snumber ≥ 2 或访问记录数 Rnumber ≥ 5(均为 M 的平均数)的项目,共得到 28 个项目。这 28 个项目中有 20 个访问了 robots.txt,其他 8 个都没有他访问 robots.txt。这 8 个项目见表 2。

合并会话集 M 中 253 个项目中其他的项目是否可以认为是网络机器人,要看它以后的访问数,若超过一定的数量,就可以检测出来。这在我们对后续日志的检测中得到了验证。

**结束语** 本文从搜索引擎网络机器人的访问行为着手,设计开发了一个基于访问内容分类的从 Web 日志检测网络机器人的方法。该方法简单快捷,查准率高。缺点是由于不分析网页的具体构成,因此只有少量访问的时候比较难确定。另外,当网站中有大量的纯文字网页时,可能会将普通的访问者当作是网络机器人。后续的研究,将考虑网页的构成以及网页中超级链接来进行检测。

**致谢:**张又又老师提供了本文的实验数据,在此表示衷心感谢!

#### 参考文献

- 1 The Robots Database. <http://www.robotstxt.org/wc/active.html>. [EB/OL]. 2004.08.01
- 2 Tan Pang-Ning, Kumar V. Discovery of Robot Sessions based on their Navigational Patterns [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2002,6(1): 9~35
- 3 Robots Exclusion. <http://www.robotstxt.org/wc/exclusion.html> [EB/OL]. 2004.08.01
- 4 Enhancing Offline Favorites. <http://msdn.microsoft.com/> [EB/OL]. 2004.08.01
- 5 Hypertext Transfer Protocol-HTTP/1.1. <http://www.w3.org/> [EB/OL]. 2004.08.01

(上接第 172 页)

复杂度为  $O(n^2)$ 。文中所给出的例子将方位关系理论研究与应用有效地结合起来,为进一步的应用研究提供了基础。显然,本文涉及的方位关系表示模型也存在一些不足,例如,模型的完备性、表示方法的认知合理性等都是进一步需要研究的问题。我们认为这些问题的研究对于常识知识表示,对于空间关系的认识以及 GIS 等应用都具有重要意义。

#### 参考文献

- 1 Pullar D, Egenhofer M. Toward formal definitions of topological relations among spatial objects. In: Proc. of the Third Intl. Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia, Aug. 1988
- 2 Egenhofer M, Herring J. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In: Proc. of the Fourth Intl. Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, Switzerland, July 1990
- 3 Papadias D, Sellis T. The semantics of relations in 2-D space using representative points; Spatial indexes. In: Proc. of the European Conf. on Spatial Information Theory, Elba, Italy, 1993

- 4 Kainz W, Egenhofer M, Greasley I. Modeling spatial relations and operations with partially ordered sets. International Journal of Geographical Information Systems, 1993, 7 (3): 215~229
- 5 Frank A. Qualitative Spatial Reasoning about Distance and Directions in Geographic Space. Journal of Visual Languages and Computing, 1992, 3: 343~373
- 6 郭平. 定性空间推理技术及应用研究: [重庆大学博士学位论文]. 重庆, 2004
- 7 Guo P, Huang-Fu T, Luo Y. A reasoning method for resolving spatial constraint satisfactory problem. In: the Proc. of the Third Intl. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 2004, 2262~2268
- 8 Vilain M, Kautz H, van Beek P. Constraints Propagation algorithms for temporal reasoning: A revised report. In: Weld D S, de Kleer J, eds. Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems, Morgan Kaufmann, 1990, 373~383
- 9 Kumar V. Algorithms for constraint satisfaction problems: A survey. Artificial Intelligence, 1992, 13(1): 32~44
- 10 Hertzberg J, Gusgen H W, et al. Relaxing constraint networks to resolve inconsistencies. In: Proc. GWAI-88, Eringerfeld, Germany, 1988, 61~65
- 11 Liu X, Shekhar S, Chawla S. Consistency Checking for Euclidean Spatial Constraints, A Dimension Graph Approach. In: the Proc. of 12th IEEE Intl. Conf. on Tools with Artificial Intelligence (IC-TAI'00), Canada, 2000, 333~343