

一种动态定性空间关系自动规划方法^{*}

宋小华^{1,2,3}, 欧阳彤^{1,2+}

¹(吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012)

²(符号计算与知识工程教育部重点实验室(吉林大学), 吉林 长春 130012)

³(空军航空大学 数学应用中心, 吉林 长春 130022)

Automated Planning Method for Dealing with Dynamic Qualitative Spatial Relations

SONG Xiao-Hua^{1,2,3}, OUYANG Dan-Tong^{1,2+}

¹(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

²(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education (Jilin University), Changchun 130012, China)

³(Center of Mathematics for Applications, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

+ Corresponding author: E-mail: ouyangdantong@163.com

Song XH, Ouyang DT. Automated planning method for dealing with dynamic qualitative spatial relations.

Journal of Software, 2012, 23(10): 2564-2571 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4182.htm>

Abstract: This paper proposes the neighborhood partition graph to describe the relationship between qualitative spatial relations and actions, which is based on conceptual neighborhood graphs. The new approach is used to address the problem of automated planning about qualitative spatial relations. Using neighborhood partition graph, the representation and reasoning for automated planning of qualitative spatial relations is proposed. Finally, the correctness of the algorithm is proved with an example to describe the application. The new approach is deals enough with dynamic qualitative spatial relations, and it has potential application in robot navigation.

Key words: qualitative spatial reasoning; automated planning; neighborhood partition graph; conceptual neighborhood graph

摘要: 为了解定性空间关系的规划问题,在概念邻域图的基础上提出描述动作与定性空间关系交互的邻域划分图.基于邻域划分图,提出了定性空间关系自动规划的形式化表示和推理算法,证明了算法的可靠性,并举例说明了新方法的应用.该方法在处理单方面空间关系规划中具有通用性,在机器人导航方面具有潜在的应用前景.

关键词: 定性空间推理;自动规划;邻域划分图;概念邻域图

中图法分类号: TP181 文献标识码: A

因为精确的定量空间信息难以取得,或者需要的空间信息无需定量精确表示,所以许多重要空间信息都是

* 基金项目: 国家自然科学基金(60973089, 60873148, 61170092, 41001302, 61103091); 吉林省科技发展计划基金(20101501, 20100185, 20090108, 20080107, 201101039); 国家教育部博士点专项基金(20100061110031); 浙江师范大学计算机软件与理论省级重中之重学科开放基金欧盟合作项目(155776-EM-1-2009-1-IT-ERAMUNDUS-ECW- L12); 吉林大学“985 工程”研究生创新基金(20080242)

收稿时间: 2011-05-28; 修改时间: 2011-06-24, 2011-08-09; 定稿时间: 2012-01-16

定性表示和推理的^[1].

在智能体的控制和自动规划方面,高层次的空间信息通常抽象为定性空间关系,智能体通过对这些定性空间关系的表示和推理来选择需要采取的动作^[2].因此,当空间信息以定性空间关系的形式描述时,针对这些空间关系制定规划,使其满足预定目标,在现实应用中非常重要.

经典的自动规划方法为了通用性,是领域无关的^[3].因此,用传统的经典规划框架在描述空间场景时,难以准确刻画定性空间关系的特有性质,这为其推理带来诸多不便.例如,空间关系的相互作用难以在状态中描述,动作与空间关系之间的相互作用难以准确表达.这给需要用定性空间关系描述的状态进行推理带来许多不便.

因此,本文针对这个问题提出了定性空间关系自动规划的表示和推理方法.首先分析了定性空间关系模型的性质,将动作视为产生定性空间关系变化的原因.针对概念邻域图无法刻画动作与空间关系的不足,构造了描述动作和定性空间关系交互的邻域划分图.并利用邻域划分图构造了基本空间关系与动作的转化表,给出了定性空间关系的自动规划的形式化表示方法,同时给出了求解定性空间关系自动规划推理算法,最后证明了算法在求解定性空间关系自动规划问题上的可靠性,并举例说明了新方法的应用.

本文第1节介绍定性空间关系及邻域划分图的基本概念.第2节介绍基于定性空间关系的自动推理的形式化表示.第3节介绍推理方法.最后给出结论和展望.

1 定性空间关系及邻域划分图

在定性空间推理中,对于给定的空间域 D ,域 D 中存在的二元定性空间关系数目是无限的.因此,我们通常根据某一空间性质给定一个完备互斥的有限关系集合 B ,对在域 D 中的二元空间关系进行划分.这样,域 D 中任意两个对象之间的空间关系都可以用 B 中的一个原子关系精确表示.当两个对象之间的空间关系不确定时,可以用两个原子的并来表示,这样,任意两个空间对象之间的可能关系就可以用 2^B 的一个元素来表示.

给定一个定性空间推理模型基本关系互斥完备集合,就可以根据其语义性质构造对应的概念邻域图.虽然概念邻域图(conceptual neighborhoods graph,简称 CNG)的概念最初是用于处理时间区间代数^[4]中时间区间连续变化的问题^[5,6],但在定性空间推理的诸多模型中得到了广泛的研究^[7-9].因为概念邻域图可以很直观地表示原子关系之间的变化路径,因此成为研究动态定性空间关系的重要手段^[10,11].此外,在应用方面,概念邻域图在智能控制^[12-14]方面已经证明非常有效.

直观上,概念邻域关系是指任意两个关系可以直接转换,而不需要变化为其他关系.以大小关系为例,如果空间关系“ A 大于 B ”要变化为“ A 小于 B ”必须先转换为“ A 等于 B ”.因此,关系“ A 等于 B ”与“ A 大于 B ”是邻域关系,而关系“ A 大于 B ”与“ A 小于 B ”则不是邻域关系.

虽然概念邻域图可以很清晰地刻画空间关系的转变,但是并未考虑空间关系为什么转变,是什么造成了这种变化.这使得概念邻域图只能被动地分析空间关系变化的结果,而不能详细地从中分析空间关系变化的实质.

为此,在概念邻域图的基础上,我们引入了“动作”的概念.我们认为,空间关系之所以发生变化,是因为在对象上施加了某种动作.例如,在方向关系上,“ a 在 b 南面”与“ a 在 b 西南面”是邻域关系.之所以会发生这种改变,是因为 a 往西移动或 b 往东移动这样的动作造成的结果.

在给定域上,当给出其完备互斥关系集合 B 和概念邻域图 $CNG(B)$ 时,可以构造一个动作关系集合 A ,如果动作集合 A 中的动作可以使得概念邻域图中所有的邻域关系相互转化,则称集合 A 为完备动作关系集合.

根据完备动作关系集合 A 、基本关系集合 B 以及 B 通过 A 转变的邻域关系集合 \approx ,可以构造一个能表示基本关系随动作变化的图,我们称其为邻域划分图(neighborhood partition graph),简称 $NPG(B)$.其形式可以如下表示:

$$NPG(B) = \{B, A, \approx\}.$$

对任意原子关系 $b \in B$,其邻域关系可以表示为 $np(b)$,其形式定义可以如下表示:

$$np(b) = \{y | (x, y, a) \in \approx, x, y \in B, a \in A\}.$$

为了表示得直观,我们将全域关系表示成一个规则的几何图形,例如圆、长方形、圆柱等.完备互斥的原子

关系用不同的组成部分表示.相邻的原子关系通过动作相互转变,每个相邻方向表示不同的动作.这样,就可以很清晰地构造邻域划分图了.

我们以方向关系为例,习惯上使用的定性关系包含东(E)、南(S)、西(W)、北(N)、东南(SE)、东北(NE)、西南(SW)、西北(NW)和中(O).在近距离表示相对方向时,也可以使用相同的符号表示:右(E)、下(S)、左(W)、上(N)、右下(SE)、右上(NE)、左下(SW)、左上(NW)和相同位置(O).

有时,不同的实际需求会使得相同的方向关系表示的范围不完全相同.以北方(N)为例,如果对正北方没有严格要求,则通常习惯将 8 个方向划分为相等的 8 个区域,那么只要 A, B 对象的连线与正北方的夹角在 22.5° 之内,都算北方,例如 Frank 提出的锥形方向关系模型^[15].但当对正北方有严格要求时,那么习惯上只有空间对象 A, B 的连线在与正北方为 0° 时,才能算为北方.

我们以锥形方向关系模型为例构造其邻域划分图.在锥形模型中,方向关系的相邻可以分为顺指针相邻(逆时针相邻)、相同位置关系 O 与其他关系相邻两种.顺时针相邻(逆时针相邻)的原子关系,可以通过对象的顺时针运动(逆时针运动)来完成;而相同位置关系 O 与其他关系的相邻,可以通过向心运动(离心运动)来完成.因此,完备的动作关系集合必须包含上述两种运动表示.

我们给定锥形方向关系模型的完备动作关系集合 $\{N, S, E, W\}$,分别表示向北(向上)、向南(向下)、向东(向右)、向西(向左)移动,因为通常局部的顺时针和逆时针运动可以视为向某个方向上的运动.例如:当对象 A, B 之间的空间关系为 N 时,顺时针方向上的运动可以看作是向西运动(W)或向西南运动(先向 W ,后向 S);而向心、离心运动也可以视为是向某个方向上的运动.例如: N 到 O 的向心运动,可以用向南(S)运动来表示;而 O 向 NE 的离心运动,可以用向东北运动来表示(先向 E 后向 N).因此,动作关系集合 $\{N, S, E, W\}$ 是锥形方向关系模型的完备动作关系集合.

确定方向关系的相邻表示与动作完备集合后,就可以如图 1 所示构造锥形方向关系模型的邻域划分图.根据完备动作关系集合的定义,也可以根据实际需要确定 $\{NE, NW, SE, SW\}$ 为其完备动作关系集合.

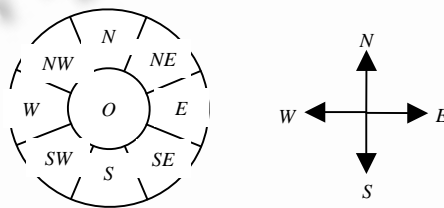


Fig.1 Cone-Based model's PNG

图 1 锥形方向关系模型的邻域划分图

在邻域划分图中,原子关系之间的相互变化都可以通过 a 执行某个动作,或者 b 执行其相反动作.例如,如果由“对象 a 在对象 b 的北方”变化为“ a, b 在同一地方”.那么,由 a 向南移动和 b 向北移动两个动作都可以完成.这时,称这两个动作为同类动作.在锥形模型的邻域划分图中,同类动作可以表示为 $N(x)=S(y); S(x)=N(y); E(x)=W(y); W(x)=E(y)$.

在研究空间关系时,因为参照对象是较少发生变化或基本不发生变化的,所以只需要研究同类动作中目标对象的动作即可.

根据方向关系的邻域划分图,我们可以得到原子关系和动作的转换表,即状态动作表,简称 SA 表.在 SA 表中:第 1 列表示原子关系,例如, N 表示 $N(x, y)$,即 x 在 y 的北方;第 1 行表示对象 x 的完备动作,表项表示所占行对应原子关系 $R(x, y)$ 与所在列对应的动作 $A(x)$ 后转变的邻域关系.

因为方向关系的不同语义解释会使相同的方向表示所指代的方向范围不同,因此对应的 SA 表不完全相同.

在表 1 中,我们给出了锥形方向关系模型的 SA 表.其中,带括号的内容为方向是正北方向关系解释下,方向

关系与动作作用的不同结果.

Table 1 SA table of cone-shape model
表 1 锥形方向关系的 SA 表

$R(x,y)$	$A(x)$			
	N	S	E	W
N	N	O	NE	NW
S	O	S	SE	SW
E	NE	SE	E	O
W	NW	SW	O	W
NE	$NE(N)$	E	$NE(E)$	N
NW	$NW(N)$	W	N	$NW(W)$
SE	E	$SE(S)$	$SE(E)$	S
SW	W	$SW(S)$	S	$SW(W)$
O	N	S	E	W

状态动作转换表 SA 清晰地刻画了原子关系和动作的转换关系.需要注意的是,状态转换图是根据实际需要,由邻域划分图和定性空间关系模型本身的性质决定的.这一点不仅在上述的方向关系中如此,在其他空间关系表示模型中,相同关系的不同语义表示,其 SA 表的表项也不完全相同.

2 定性空间关系规划描述

定性空间关系的规划问题就是给定现有的空间关系表示,求解动作序列,使其满足目标空间关系表示的规划.

与经典规划不同,定性空间关系是以有限空间关系种类来表示无限的对象之间的空间关系;而且因为受实际需求的限制,在特定语境下,对不同的定性关系有不同的限制.下面,我们给出定性空间关系规划的定义.

定义 1(定性空间关系规划域). 定性空间关系规划域是一个元组 $D=(B,X,S_0,A,N,R)$:

- B 是完备互斥的定性空间原子关系集合;
- X 是空间对象集合;
- S_0 是 X 中的空间对象在 B 上成立的初始关系集合;
- A 是空间对象允许的完备动作集合;
- N 是空间对象在 B 上不允许的关系集合;
- R 是由 B 的邻域划分图得来的 SA 表,即 $B \times A \rightarrow B$.

在定性空间关系规划域中,基本关系集合 B 是由选择的理论模型给出的,如拓扑关系模型 RCC、锥形方向关系等.动作关系集合 A 是根据实际需要给出的,但必须保证其是完备的.也就是说,必须保证 B 中的任意相邻原子关系之间的转变都能通过动作关系集合 A 中的动作完成. R 为由 B 的邻域划分图得来的 SA 表.

例 1:如图 2 所示,在公路上行驶的两辆汽车 A,B ,考虑相对运动,设车可以向左、右、前、后 4 个方向行驶,初始状态为 B 在 A 前方且都在右车道,假设汽车 B 行驶速度方向不变,对车 A 进行自动规划,使其满足目标状态: A 完成超车,使得 A 在 B 前方,其都在右车道.

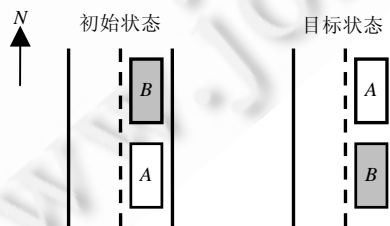


Fig.2 An example of automated planning for qualitative spatial relations

图 2 简单的定性空间关系规划实例

将这个问题在二维平面中加以考虑,只有对象 A 和 B ,初始关系为 $N(B,A)$,允许车 A 有 4 个动作:向前 $N(A)$ 、向后 $S(A)$ 、向左 $W(A)$ 、向右 $E(A)$ 。

此外,车 A 和车 B 都是刚性对象,不可能同时存在于同一个地点,所以方向关系 $O(A,B)$ 不可能成立;而车 B 速度、方向不变, A 不可能从 B 右侧走,故 $E(A,B),SE(A,B),NE(A,B)$ 也不能成立。

根据定义 1,例 1 可形式化表示如下:

- $B=\{N,S,W,E,NE,NW,SE,SW,O\}$;
- $X=\{a,b\}$;
- $S_0=\{N(b,a)\}$;
- $N=\{O(A,B),E(A,B),SE(A,B),NE(A,B)\}$;
- R 如表 1 所示。

定义 2(定性空间关系规划). 定性空间关系规划是一个动作序列 $\pi=(a_1,a_2,\dots,a_k)$,其中, $k \geq 0$. 规划的长度是 $|\pi|=k$,即动作数目.如果 π_1 和 π_2 都是规划,则它们的连接 $\pi_1\pi_2$ 也是规划。

由定义 2 可知,复杂的规划问题可以先拆分为各个阶段,每个阶段设定小的规划目标,每个阶段的规划目标是下一个阶段的起始状态.这样,一个复杂的定性空间规划问题就可以拆分为具有各个子目标的分阶段规划问题,从而简化问题的求解过程.最后,整个规划问题的规划就是各个子阶段的规划的连接。

定义 3(定性空间关系规划问题). 称 $P=(D,g)$ 是一个定性空间关系规划问题, D 是定性空间关系规划域; g 是 X 中的空间对象在 B 上成立的关系集合,表示规划目标.如果 $g \subseteq R(S_0,\pi)$,则规划 π 是 P 的一个解。

例 1 中描述的规划问题,若给定 $g=\{N(a,b)\}$,则其可以有如下规划解:

- $\pi_1=\{E(a),N(a),W(a)\}$;
- $\pi_2=\{E(a),N(a),S(a),N(a),W(a)\}$;
- $\pi_3=\{E(a),W(a),E(a),N(a),W(a)\}$ 。

定义 4(定性空间关系规划问题极小解). 设 $P=(D,g)$ 是一个定性空间关系规划问题,规划 π 是 P 的一个解.如果存在 π 的一个真子集也是 P 的解,称 π 是冗余解;如果不存在 π 的真子集是 P 的解,则称解 π 是极小解。

在上述例子中, $\pi_1=\{E(a),N(a),W(a)\}$ 是极小解. π_2,π_3 为冗余解.需要注意的是,对于给定的定性空间规划问题 P ,极小解有可能不止一个,可能存在长度不相同的极小解.因此,有的极小解不一定是所有解中长度最小的。

3 定性空间关系规划的求解

求解定性空间规划问题,就是对以定性空间关系规划问题 $P=(D,g)$ 为输入,求得规划解 π 的过程.为此,我们给出了算法 SPATIALPLAN,如果 P 是可解的,则返回规划解;如果 P 是不可解的,则返回失败。

算法中用到的 $stateof(stateAction)$ 函数表示对空间状态对 $stateAction$ 得到其状态.定义了 $Plan$ 表来存储最后的规划结果. $Delete$ 表用来记录删除不允许的节点和重复访问过的节点。

算法.

1. function SPATIALPLAN(S_0,g)
2. $Plan$ 表= SA 中所有达到 g 的状态动作对
3. $newplan$ 表= $delete$ 表=空
4. while ($newplan$ 表 $\neq plan$ 表)
5. 取 $plan$ 表中未曾扩展的状态动作对 $stateAction$
6. if $S_0 \subseteq stateof(stateAction) \cup g$
7. 返回 $plan$ 表
8. if ($stateof(stateAction) \subseteq (stateof delete$ 表)
9. 删除 $stateAction$ //删除与 $delete$ 表中产生循环的关系
10. else if ($stateof(stateAction) \subseteq N \cup stateof(plan$ 表)

11. 删除 *stateAction* 到 *delete* 表 //删除在 *N* 中不允许的关系和产生循环的关系
12. else *newplan* 表=*plan* 表 \cup SA 中所有到达 *stateof(stateAction)*的状态动作对
13. 返回 *failure*

用算法 SPATIALPLAN 求解例 1 中的规划,初始状态是 $S_0=\{N(b,a)\}$,目标状态为 $g=\{N(a,b)\}$.首先,为了关系表达的一致性,对初始状态等价变化,因为 $N(b,a)=S(a,b)$,即 $S_0=\{S(a,b)\}$.

算法执行的第 1 步是判断到达 $g=\{N(a,b)\}$ 的所有状态动作对,将其全部加入 *plan* 表,然后对 *plan* 表中任意一个状态关系对进行继续扩展.

算法执行过程可以用图 3 表示,深色背景的内容表示删除的节点,其中直角矩形的节点是因产生循环而删除的节点,无边框圆角矩形节点表示在 *N* 中不允许出现的关系节点.

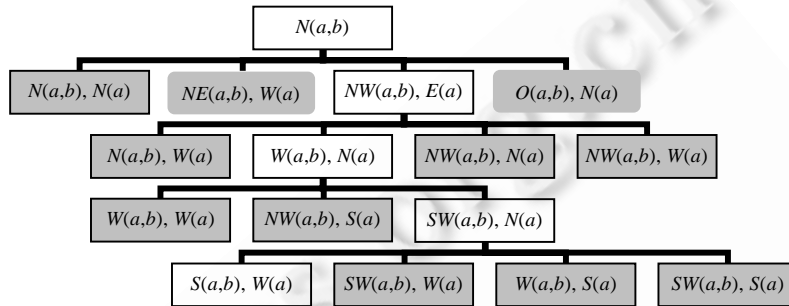


Fig.3 Solving process of planning with dynamic qualitative spatial relations

图 3 动态定性空间关系规划的求解过程

可以看出,一个规划解为 $W(a),N(a),N(a),E(a)$,表示车 *a* 先向左开,再向前开,接着向前开,最后向右开.我们可以用图 4 表示车 *a* 的动作和车 *a* 与车 *b* 定性空间关系的变化路径:车 *a* 先向左开,满足 $SW(a,b)$ 时向前开;满足 $W(a,b)$ 时接着向前开;满足 $NW(a,b)$ 时向右开.即完成目标 $N(a,b)$,成功完成超车的动作规划.

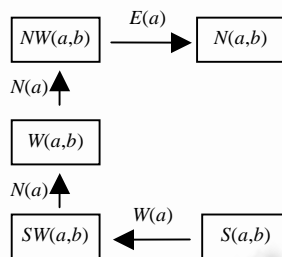


Fig.4 Representation of planning solution

图 4 规划解表示

从规划解中可以看出,对象 *a* 向上运动的动作 $N(a)$ 重复了 1 次.这是因为算法在求解规划解时是按照状态动作对进行搜索的,通过状态的变化来确定动作.故虽然都是向上的动作,但是两个动作的初始状态和结束状态是不同的.在图 4 中我们可以看到,第 1 个 $N(a)$ 使得空间关系从 $SW(a,b)$ 转换为 $W(a,b)$,而第 2 个 $N(a)$ 使得空间关系从 $W(a,b)$ 转换为 $NW(a,b)$.所以,求得的规划解虽然不是极小解,但是这种规划解的表示使得规划的描述更为精确,而且只有在这种情况下才会产生冗余的重复操作,去除重复操作后可以得到极小解.下面,我们研究算法的性质.

定理 1. 算法 SPATIALPLAN 对求解定性空间规划问题 $P=(D,g)$ 是可靠的.即,任何由算法 SPATIALPLAN 产生的规划都是定性空间规划问题 $P=(D,g)$ 的一个解.

证明:

- 当 $g=S_0$ 时,由语句返回 *plan* 表为空,表示 π 为空,为规划解;
- 当 $g \neq S_0$ 时,假设求得的 SA 表中的动作序列为 $\pi=a_0a_1 \dots a_n$, 往证 $g=R(S_0, \pi)$:
 - 若 π 只包含一个动作 a , 因为 a 是根据算法第 1 步迭代 *Plan* 表=SA 中所有达到 g 的状态动作对 *stateaction* 求得,即满足 $R(S,A)=g$,故 $\pi=a$ 是规划问题的解;
 - 对于动作序列 π 中的任意 a_i , 由算法的第 $n-i$ 迭代中,由某个 S_i 和动作 a_i 满足 $S_{i+1}=R(S_i, a_i)$ 求得.由算法迭代和 SA 表的定义,可保证 S_{i+1}, S_i 和 a_i 必在 *Plan* 表中,即规划序列 π 满足:

$$g=R(S_n, a_i)=R(R(S_{n-1}, a_{n-1}), a_n)=R(R(R \dots R(S_0, a_0) \dots) a_{n-1}), a_n),$$

即 $g=R(S_0, \pi)$, 故 $\pi=a_0a_1 \dots a_n$ 是定性空间规划问题 $P=(D, g)$ 的一个解.

定理得证. □

由定理 1 可以看出,算法 SPATIALPLAN 的解是可靠的,但是因为有冗余解的存在,算法求解定性空间规划问题 $P=(D, g)$ 并不完备.

4 结 论

针对经典规划方法在定性空间关系表示上的不足,本文基于邻域划分图提出定性空间关系的自动规划方法.首先,基于邻域划分图刻画动作与定性空间邻域关系之间的关系,给出了状态动作表;随后,用完备互斥的空间关系集合以及其邻域划分图来描述定性空间关系的规划问题,提出了规划求解方法,同时证明了算法的可靠性;利用定性方向的规划描述了以小车超车为例的规划问题,并对其进行了推理.结果表明,算法对定性方向规划问题的解决非常有效.

因为定性空间关系规划的描述和推理是基于通用的定性空间关系表示,并不依赖于具体某一方面的特定属性,因此其形式化表示方法具有一般性,在其他方面的空间关系中(如拓扑关系等)也同样适用.

在结合多方面空间关系方面,现有的大多数方法^[16-19]都是解决约束网络的相容,而并没有考虑动作与空间关系之间的相互影响.而邻域划分图在表示结合多方面空间关系模型及与动作关系方面非常有效,因此,用本文的方法来解决结合多方面空间关系的复杂规划问题有潜在的应用价值.

References:

- [1] Cohn AG, Renz J. Qualitative spatial representation and reasoning. In: van Harmelen F, *et al.*, eds. Handbook of Knowledge Representation. Amsterdam: Elsevier, 2008. 551-596. [doi: 10.1007/3-540-70736-0_3]
- [2] Dylla F, Moratz R. Exploiting qualitative spatial neighborhoods in the situation calculus. In: Freksa C, *et al.*, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Spatial Cognition IV: Reasoning, Action, Interaction. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 304-332. [doi: 10.1007/978-3-540-32255-9_18]
- [3] Ghallab M, Nau D, Traverso P. Automated Planning: Theory and Practice. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2004.
- [4] Allen JF. Maintaining knowledge about temporal intervals. Communications of the ACM, 1983,26(11):832-843. [doi: 10.1145/182.358434]
- [5] Freksa C. Conceptual neighborhood and its role in temporal and spatial reasoning. In: Singh MG, Travé-Massuyès L, eds. Proc. of the IMACS Workshop on Decision Support Systems and Qualitative Reasoning. Amsterdam: Elsevier, 1991. 181-187.
- [6] Freksa C. Temporal reasoning based on semi-intervals. Artificial Intelligence, 1992,54(1-2):199-227. [doi: 10.1016/0004-3702(92)90090-K]
- [7] Egenhofer MJ. The family of conceptual neighborhood graphs for region-region relations. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Geographic Information Science. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 42-55. [doi: 10.1007/978-3-642-15300-6_4]
- [8] Friedman S, Forbus KD. An integrated systems approach to explanation-based conceptual change. In: Proc. of the 24th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI 2010). AAAI Press, 2010. 1523-1530.
- [9] Reis RMP, Egenhofer MJ, Matos J. Conceptual neighborhoods of topological relations between lines. In: Ruas A, Gold C, eds. Proc. of the 13th Int'l Symp. on Spatial Data Handling. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 557-574. [doi: 10.1007/978-3-540-68566-1_32]

- [10] Galton A. Towards a qualitative theory of movement. In: Frank AM, Kuhn W, eds. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Spatial Information Theory (COSIT). Berlin: Springer-Verlag, 1995. 377–396.
- [11] de Weghe NV, Maeyer PD. Conceptual neighbourhood diagrams for representing moving objects. In: Bertolotto M, ed. Proc. of the CoMoGIS. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 228–238. [doi: 10.1007/11568346_25]
- [12] Moratz R, Dylla F, Frommberger L. A relative orientation algebra with adjustable granularity. In: Proc. of the Workshop on Agents in Real-Time and Dynamic Environments (IJCAI 2005). Edinburgh, 2005. 61–70.
- [13] Dylla F, Bhatt M. Qualitative spatial scene modeling for ambient intelligence environments. In: Xiong C, *et al.*, eds. Proc. of the Intelligent Robotics and Applications. 2008. 716–725. [doi: 10.1007/978-3-540-88513-9_77]
- [14] Dylla F, Lee JH. A combined calculus on orientation with composition based on geometric properties. In: Coelho H, *et al.*, eds. Proc. of the 19th European Conf. on Artificial Intelligence (ECAI 2010). Amsterdam: IOS Press, 2010. 1087–1088.
- [15] Frank AU. Qualitative spatial reasoning about distance and directions in geographic space. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1992,3(4):343–373. [doi: 10.1016/1045-926X(92)90007-9]
- [16] Gerevini A, Renz J. Combining topological and size information for spatial reasoning. *Artificial Intelligence*, 2002,137(1-2):1–42. [doi: 10.1016/S0004-3702(02)00193-5]
- [17] Wang SS, Liu DY, Xie Q, Wang XY. Integrating multi-aspect information for qualitative spatial reasoning and application. *Journal of Software*, 2003, 14(11):1857–1862 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1857.htm>
- [18] Li SJ. Combining topological and directional information for spatial reasoning. In: Veloso MM, ed. Proc. of the IJCAI. AAAI Press, 2007. 435–440.
- [19] Liu WM, Li SJ, Renz J. Combining RCC-8 with qualitative direction calculi: Algorithms and complexity. In: Boutilier C, ed. Proc. of the IJCAI. AAAI Press, 2009. 854–859.

附中文参考文献:

- [17] 王生生,刘大有,谢琦,王新颖.集成多方面信息的定性空间推理及应用.软件学报,2003,14(11):1857–1862. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1857.htm>



宋小华(1981—),男,新疆克拉玛依人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为定性空间推理.



欧阳丹彤(1968—),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为基于模型诊断,模型检测,自动推理.