

简单凹形区域间空间关系的一种表示及推理模型

欧阳继红^{1,2}, 富 倩^{1,2}, 刘大有^{1,2}

(1. 吉林大学计算机科学与技术学院, 吉林长春 130012;

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

摘 要: 空间拓扑关系的代表模型有区域连接演算 RCC 和 9-交集模型. 针对凹形区域间空间关系的研究工作主要有 Cohn 提出的 RCC23. RCC23 的表达力相对有限, 在实际应用中具有一定的局限性. 本文针对简单凹形区域空间关系的表示及推理, 基于 Egenhofer 和 El-Geresy 的空间推理方法, 完成了如下工作: 扩展 9-交集矩阵得到 16-交集矩阵; 基于 16-交集矩阵扩展 RCC23 提出了 RCC62; 给出了 RCC62 的概念邻域图和最近拓扑关系图; 提出了 RCC62 关系复合的推理规则. RCC62 比 RCC23 新增了 39 种基本关系, 表达力更强; RCC62 的推理规则可以推导出 RCC62 的复合表.

关键词: 拓扑关系; 简单凹形区域; 凸壳; RCC23; 9-交集

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2009) 08-1830-07

A Model for Representing and Reasoning of Spatial Relations between Simple Concave Regions

OUYANG Ji-hong^{1,2}, FU Qian^{1,2}, LIU Da-you^{1,2}

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

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

Abstract: The most typical models of spatial topological relations are Region Connection Calculus(RCC) and 9-intersection model. However, there are few contributions on topological relations of concave regions in which the representative model is Cohn's RCC23. There are some limitations of RCC23 especially in practical applications due to its less expressiveness. On the basis of Egenhofer's and El-Geresy's general methods for spatial reasoning, this paper completed the following work: 9-intersection matrix is extended to 16-intersection matrix; RCC23 is refined to RCC62 based on 16-intersection matrix; the Conceptual Neighborhood Graph (CNG) and the Closest Topological Relation Graph (CTRG) of RCC62 are given; reasoning rules for RCC62 composed relations are presented. There are 39 new relations in RCC62, which is more expressive than RCC23; Base on the reasoning rules of RCC62, the composition table of RCC62 can be derived.

Key words: topological relation; simple concave region; convex hull; RCC23; 9-intersection

1 引言

近年来空间关系形式化模型受到相关领域研究者的极大关注^[1], 拓扑关系作为基本的空间关系, 是定性空间推理研究的基本问题之一.

目前大多数拓扑关系模型都采用逻辑方法和代数方法进行研究, 其中最具有代表性的是区域连接演算 (Region Connection Calculus, RCC)^[2] 和交集模型^[3,4]. 多数模型研究的是一般区域间的空间关系, 针对凹形区域空间关系的研究主要有 Cohn 等人提出的 RCC23^[5]. 然而 RCC23 的表达力相对有限, 实际问题中基于该模型进行

空间关系查询, 可能会导致查询结果不准确甚至查询失败, 因此研究并建立表达力更强的凹形区域空间关系的表示及推理模型是必要的.

本文基于 El-Geresy 等^[6] 提出的空间推理方法, 对 9-交集模型^[4] 进行扩展, 得到 16-交集矩阵; 基于 16-交集矩阵, 对 RCC23^[5] 进行细化, 在 RCC23 的基础上新增了 39 种关系, 定义了 RCC62. RCC62 的表达力强于 RCC23; 给出 RCC62 的概念邻域图和最近拓扑关系图; 建立了 RCC62 的推理系统, 在此基础上推导出了 RCC62 的复合表.

收稿日期: 2007-11-19; 修回日期: 2008-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60573073, No. 60773099, No. 60503016, No. 60603030, No. 60703022); 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2006AA10Z245, No. 2006AA10A309); 吉林省科技发展计划重点项目 (No. 20060213)

2 相关研究工作

2.1 RCC 理论和 RCC23

1992 年, Randell 等^[2]提出 RCC 理论. 假设一个原始的二元关系 $C(x, y)$ 表示区域 x 与 y 连接, 使用 C 可定义 8 个基本关系: $\{DC, EC, PO, TPP, NTPP, TPPI, NTPPI, EQ\}$. 1992 年, Freksa^[7] 提出概念邻域图 (Conceptual Neighborhood Graph, CNG), 用于描述空间关系的连续变化, 其中节点表示基本关系, 两节点间有弧连接则表示空间对象通过连续变化可以从一种关系直接转换到另一种关系.

1997 年, Cohn 等^[5]以区域的凸壳为基元, 定义了新谓词 INSIDE, P-INSIDE, OUTSIDE 及其逆关系 INSIDEi, P-INSIDEi, OUTSIDEi. 得到两个凹形区域之间的 23 个 JEPD 关系, 即 RCC23.

2.2 交集模型

1991 年, Egenhofer 等^[3]提出 4-交集模型, 得到 16 种空间拓扑关系. 当考虑实际空间对象时, 得到 8 种拓扑关系, 与 RCC8 关系相对应. 同年, Egenhofer 等^[4]将区域的补作为其外部 A^- , 扩展 4-交集模型为 9-交集模型.

1992 年, Egenhofer^[8]提出最近拓扑关系图 (Closest Topological Relation Graph, CTRG), 其中节点表示基本关系, 两节点间有弧连接表示两节点所对应关系间的拓扑距离最小.

2.3 El-Geresy 的空间关系推理方法

1997 年, El-Geresy 等^[6]通过给出任意空间中不同复杂度对象间复合表的构造方法, 提出了一种通用定性空间关系推理方法.

3 RCC62

3.1 表示系统

首先给出本文用到的基本概念.

定义 1 取平面区域 x 中任意两点 E, F 作连线, 若连线上任意点 P 总在区域 x 中, 则称 x 为凸形区域.

定义 2 取平面区域 x 中任意两点 E', F' 作连线, 若连线上存在一点 P' 不在 x 中, 则称 x 为凹形区域.

定义 3 平面内包含区域 x 的最小凸形区域, 称为 x 的凸壳, 凸壳函数^[2]记为 $\text{conv}(x)$.

定义 4 凹形区域 x 的凸壳与 x 自身作差得到的部分, 称为 x 的内侧, 内侧函数^[2]记为:

$$\text{inside}(x) = \text{def} \{y \mid \forall z [C(z, y) \leftrightarrow \exists w [\text{INSIDE}(w, x) \wedge C(z, w)]] \}$$

定义 5 凹形区域 x 的凸壳的补集, 称为 x 的外侧, 外侧函数^[2]记为:

$$\text{outside}(x) = \text{def} \{y \mid \forall z [C(z, y) \leftrightarrow \exists w [\text{OUTSIDE}(w, x) \wedge C(z, w)]] \}$$

$$\exists w [\text{OUTSIDE}(w, x) \wedge C(z, w)]] \}$$

定义 6 谓词 $\text{Concavity}(x, y) \equiv_{\text{def}} \text{MAX}_y P(x, \text{inside}(y))$ 表示 x 是凹形区域 y 的内侧的最大连通子部分^[5], 若谓词 $\text{Concavity}(x, y)$ 为真, 则称 x 是 y 的一个凹处.

定义 7 若凹形区域 x 只含有一个凹处, 则称 x 为简单凹形区域.

定义 8 包含区域 x 的空间全域, 称为 x 的嵌入空间.

如图 1(a) 所示, x (浅灰色部分) 为简单凹形区域, 矩形框表示 x 的嵌入空间. y 是 x 的内侧, 这里也是 x 的一个凹处, C (右斜线区域) 是 x 的凸壳, Z (左斜线区域) 是 x 的外侧.

如图 1(b) 所示, $y_1 \cup y_2$ 是非简单凹形区域的内侧, y_1, y_2 分别是 x' 的两个凹处, C' (右斜线区域) 是区域 x' 的凸壳, Z' (左斜线区域) 是 x' 的外侧.

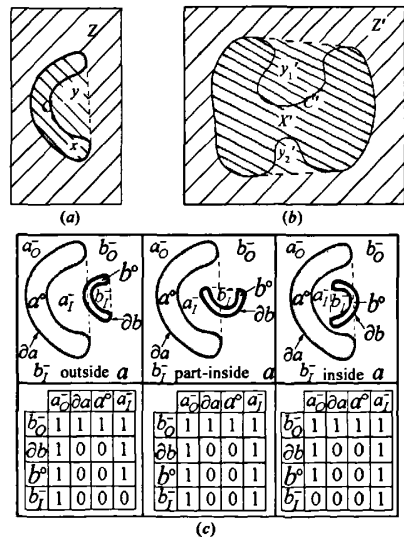


图1 (a)简单凹形区域 x 的内侧 y , 外侧 Z , 凸壳 C 和凹处 y ;
(b)非简单凹形区域 x' 的内侧 $y_1 \cup y_2$, 外侧 Z' , 凸壳 C' 和凹处 y_1, y_2 ;
(c)简单凹形区域的16-交集矩阵表示

3.1.1 16-交集矩阵

对 9-交集矩阵^[4]进行扩展, 将凹形区域的外部再分解为两个子部分, 即凹形区域的内侧和外侧. 从而, 凹形区域 a 及其嵌入空间 A 被划分为四个子部分: 内部 a^o , 边界 ∂a , 内侧 a_i^- 和外侧 a_o^- (其中, $a^o, \partial a, a_i^-$ 都是有限子部分, a_o^- 是无限子部分), 考虑这四个子部分间两两相交的情况 (交集为空或非空), 从而得到 16-交集矩阵.

定义 9 令 A, B 是简单凹形区域 a, b 的嵌入空间, $a^o, \partial a, a_i^-, a_o^-$ 分别是 a 的内部, 边界, 内侧和外侧, $b^o, \partial b, b_i^-, b_o^-$ 分别是 b 的内部, 边界, 内侧和外侧,

则 a, b 的空间关系 $R_T(a, b)$ 可以表示为如下的 16-交集矩阵:

$$R_T(a, b) = \begin{pmatrix} a^\circ \cap b^\circ & a^\circ \cap \partial b & a^\circ \cap b_i^- & a^\circ \cap b_o^- \\ \partial a \cap b^\circ & \partial a \cap \partial b & \partial a \cap b_i^- & \partial a \cap b_o^- \\ a_i^- \cap b^\circ & a_i^- \cap \partial b & a_i^- \cap b_i^- & a_i^- \cap b_o^- \\ a_o^- \cap b^\circ & a_o^- \cap \partial b & a_o^- \cap b_i^- & a_o^- \cap b_o^- \end{pmatrix}$$

若两个子部分间交集非空, 则取值为 1, 否则取值为 0. 交集矩阵中元素的不同组合表示了不同的空间关系.

3.1.2 RCC62 的基本关系

如图 1(c) 所示, 考虑岛屿 a 与小岛 b 的空间关系, 均有: a 位于 b 的外侧, 且 b 部分位于 a 的内侧, 它们同属于 RCC23 中的 OPD 关系. 进一步考虑 b 的海湾部分 (即 b_i^-) 与 a 的空间关系, 从左至右有: b_i^- 在 a 的外侧, b_i^- 部分在 a 的内侧, b_i^- 在 a 的内侧. 若基于 RCC23 进行空间检索或查询, 则无法区分这三种情况, 但采用

我们的 16-交集矩阵表示, 能够得到三个不同的 16-交集矩阵, 如图 1(c) 所示, 从而能够区分出这三种不同情况. 因此, 基于 RCC62 的空间检索或查询能够得到更加准确或更贴近实际情况的检索结果.

采用类似方法, 基于 16-交集矩阵表示法对 RCC23 进行扩展, 可以定义出两个简单凹形区域间的 62 种基本关系, 得到 RCC62. 各关系的交集矩阵及其示意图, 如表 1 所示.

3.1.3 RCC23 和 RCC62 的关系

RCC62 是在 RCC23 的基础上扩展而得, 它们之间存在着密切的联系, 如图 2(a) 所示. 其中, 字母标识的实心圆代表 RCC23 的基本关系, 数字标识的空心圆表示 RCC62 的基本关系. 从图 2(a) 中可以看出, RCC62 能区分出比 RCC23 更多的空间关系, 对空间关系的刻画更细, 表达力更强.

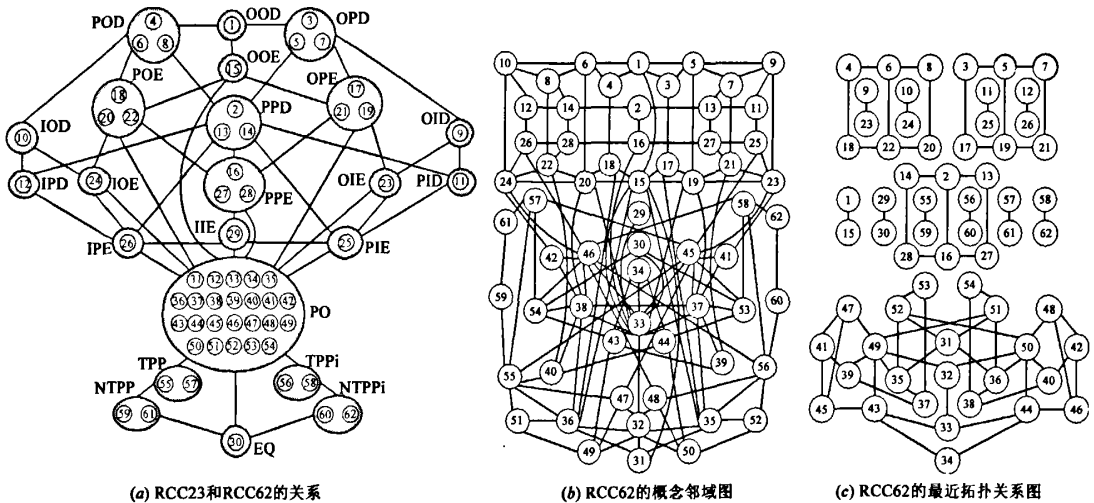


图2

3.1.4 RCC62 的概念邻域图和最近拓扑关系图

目前描述关系连续变化的主要方法有概念邻域图^[7]和最近拓扑关系图^[8]. 我们给出了 RCC62 的概念邻域图和最近拓扑关系图, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示, 为进一步研究 RCC62 关系的推理奠定基础.

可看出, 图 2(b) 与图 2(c) 差别较大, 特别地, 图 2(c) 不是连通图. 这是由于凹形区域被划分为外部、凹处、边界和内部四个部分, 但四者之间没有平滑的过渡区, 因而最近拓扑关系图 (图 2(c)) 所表达的拓扑关系连续变化性是很粗略的. 相比之下, 概念邻域图 (图 2(b)) 对关系连续变化的描述更符合认知, 表达更准确.

3.2 推理系统

基于 Egenhofer^[8] 和 El-Geresy 等^[6] 提出的空间推理方法, 我们建立了 RCC62 的推理系统, 主要包括两个方

面: (1) 对象间空间关系的一般约束; (2) 对象间空间关系传播的推理规则.

3.2.1 一般约束

令 X, Y 分别是简单凹形区域 x, y 的嵌入空间, x_i ($1 \leq i \leq 4$, $x_i \in \{x^\circ, \partial x, x_i^-, x_o^-\}$), y_j ($1 \leq j \leq 4$, $y_j \in \{y^\circ, \partial y, y_j^-, y_o^-\}$) 分别是 X, Y 中的子部分, 给出 RCC62 推理系统的三种一般约束如下:

$$(1) x_o^- \cap y_o^- \neq \phi$$

$$(2) (x^\circ \cap y^\circ \neq \phi \vee x^\circ \cap \partial y \neq \phi \vee x^\circ \cap y_i^- \neq \phi \vee x^\circ \cap y_o^- \neq \phi) \wedge (\partial x \cap y^\circ \neq \phi \vee \partial x \cap \partial y \neq \phi \vee \partial x \cap y_i^- \neq \phi \vee \partial x \cap y_o^- \neq \phi) \wedge (x_i^- \cap y^\circ \neq \phi \vee x_i^- \cap \partial y \neq \phi \vee x_i^- \cap y_i^- \neq \phi \vee x_i^- \cap y_o^- \neq \phi) \wedge (x_o^- \cap y^\circ \neq \phi \vee x_o^- \cap \partial y \neq \phi \vee x_o^- \cap y_i^- \neq \phi \vee x_o^- \cap y_o^- \neq \phi)$$

表1 RCC62的基本关系

$R_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_3 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$R_4 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_5 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_6 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_7 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_8 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_9 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{10} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{11} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{12} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$R_{13} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{14} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{15} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{16} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{17} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{18} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_{19} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{20} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{21} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{22} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{23} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{24} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$R_{25} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{26} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{27} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{28} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{29} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{30} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_{31} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{32} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{33} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{34} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{35} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{36} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_{37} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{38} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{39} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{40} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{41} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{42} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$R_{43} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{44} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{45} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{46} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$R_{47} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$R_{48} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
$R_{49} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{50} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{51} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{52} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{53} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{54} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_{55} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{56} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{57} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{58} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{59} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{60} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
$R_{61} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$R_{62} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$				

(3)若 $x_i^- \cap \partial y \neq \emptyset$, 则 $x_i^- \cap y^\circ \neq \emptyset$; 同样, 若 $y_i^- \cap \partial x \neq \emptyset$, 则 $y_i^- \cap x^\circ \neq \emptyset$.

这三种一般约束分别说明: 凹形的外侧必然与另一凹形的外侧相交; 在交集矩阵中不存在其值均为空的行或列; 若 x_i^- 与 ∂y 交集非空, 则必然有 x_i^- 与 y° 交集非空; 若 y_i^- 与 ∂x 交集非空, 则必然有 y_i^- 与 x° 交集非空.

3.2.2 推理规则

本文空间关系的复合基于子集关系的传递性质.

定义 10 令 X, Y 分别是简单凹形区域 x, y 的嵌入空间, $x' = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\} (x_i \in \{x^\circ, \partial x, x_i^-, x_i^-\}, 1 \leq m \leq 4, 1 \leq i \leq m)$ 是 X 中子部分的集合, $y_j (1 \leq j \leq 4, y_j \in \{y^\circ, \partial y, y_j^-, y_j^-\})$ 是 Y 中的子部分, 则 $y_j \subseteq x'$ 表示如下关系:

$$\forall x_i \in x' ((y_j \cap x_i \neq \emptyset) \wedge (y_j \cap (X - x') = \emptyset))$$

$y_j \subseteq x'$ 的直观解释是: y_j 与 x' 中的每个子部分都相交, 并且与 x' 之外的任何子部分都不相交.

定理 1 令 X, Y, Z 分别是简单凹形区域 x, y, z 的嵌入空间, $x_i (1 \leq i \leq 4, x_i \in \{x^\circ, \partial x, x_i^-, x_i^-\})$, $y_j (1 \leq j \leq 4, y_j \in \{y^\circ, \partial y, y_j^-, y_j^-\})$, $z_k (1 \leq k \leq 4, z_k \in \{z^\circ, \partial z, z_k^-, z_k^-\})$ 是 X, Y, Z 中的子部分, 则有:

$$(x_i \cap y_j \neq \emptyset) \wedge (y_j \subseteq z_k) \rightarrow (x_i \cap z_k \neq \emptyset)$$

定理 1 的直观解释是: 若 x_i 和 y_j 的交集非空, 并且 y_j 是 z_k 的子集, 那么可以推出 x_i 和 z_k 的交集也非空.

下面给出描述空间关系复合中交集传播关系的两种推理规则:

规则 1 (非空交集传播规则) 令 X, Y, Z 分别是简单凹形区域 x, y, z 的嵌入空间, $x' = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\} (x_i \in \{x^\circ, \partial x, x_i^-, x_i^-\}, 1 \leq m \leq 4, 1 \leq i \leq m)$ 是 X 中子部分的集合, $x' \subseteq X$, $y_j (1 \leq j \leq 4, y_j \in \{y^\circ, \partial y, y_j^-, y_j^-\})$ 是 Y 中的子部分, $z' = \{z_1, \dots, z_k, \dots, z_n\} (z_k \in \{z^\circ, \partial z, z_k^-, z_k^-\}, 1 \leq n \leq 4, 1 \leq k \leq n)$ 是 Z 中子部分的集合, $z' \subseteq Z$. 描述 X, Y, Z 间非空交集传播的规则如下:

$$\begin{aligned} & (x' \supseteq y_j) \wedge (y_j \subseteq z') \rightarrow (x' \cap z' \neq \emptyset) \\ & \equiv (x_1 \cap z_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee x_1 \cap z_n \neq \emptyset) \\ & \quad \wedge (x_2 \cap z_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee x_2 \cap z_n \neq \emptyset) \wedge \dots \\ & \quad \wedge (x_m \cap z_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee x_m \cap z_n \neq \emptyset) \\ & \quad \wedge (z_1 \cap x_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee z_1 \cap x_m \neq \emptyset) \\ & \quad \wedge (z_2 \cap x_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee z_2 \cap x_m \neq \emptyset) \wedge \dots \\ & \quad \wedge (z_n \cap x_1 \neq \emptyset \vee \dots \vee z_n \cap x_m \neq \emptyset) \end{aligned}$$

规则 1 的直观解释为: 若 y_j 与 x' 中的每个子部分都相交, 那么 x' 的每个子部分与 z' 中至少一个子部分相交, 反之亦然.

规则 2 (空交集传播规则) 令 X, Y, Z 分别是简

单凹形区域 x, y, z 的嵌入空间, $x_i (1 \leq i \leq 4, x_i \in \{x^0, \partial x, x_i^-, x_0^-\})$ 是 X 中的子部分, $y' = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_l\} (y_j \in \{y^0, \partial y, y_l^-, y_0^-\}, 1 \leq l \leq 4, 1 \leq j \leq l)$ 是 Y 中子部分的集合, $y' \subseteq Y, z' = \{z_1, \dots, z_k, \dots, z_n\} (z_k \in \{z^0, \partial z, z_k^-, z_0^-\}, 1 \leq n \leq 4, 1 \leq k \leq n)$ 是 Z 中子部分的集合, $z' \subseteq Z$. 描述 X, Y, Z 间空交集传播的规则如下:

$$(x_i \subseteq y') \wedge (y' \subseteq z') \rightarrow x_i \subseteq z' \rightarrow x_i \not\subseteq (Z - z') \\ \equiv (x_i \cap (Z - z_1 - \dots - z_n) = \phi)$$

规则 2 的直观解释为: 若 x_i 与 y' 中的每个子部分都相交, 且 y' 包含于 z' , 那么 x_i 与 z' 中的每个子部分也相交, 从而与 z' 之外的每个子部分都不相交.

3.2.3 推理系统的可靠性及完备性证明

若由该系统推导出的结论都遵循集合论, 则该系统是可靠的; 若由集合论语义推出的任何结论也能由该系统推出, 则该系统是完备的.

该系统的可靠性及完备性证明主要用到集合论中的两条基本公理: 传递性公理和集合交集公理.

(1) 子集传递性: $A \subseteq B \subseteq C \rightarrow A \subseteq C$, 其蕴含式为 $A \subseteq C \rightarrow A \cap C^- = \phi$, 其中 C^- 为 C 的补集;

(2) 集合交集: $A \cap B \cap B \subseteq C \rightarrow A \cap C \neq \phi$ 及 $C \cap B \cap B \subseteq A \rightarrow A \cap C \neq \phi$.

推理系统的可靠性证明:

规则 1 表示如下:

$$(x' \supseteq y_j) \wedge (y_j \subseteq z') \rightarrow (x' \cap z' \neq \phi) \\ \equiv (x_1 \cap z_1 \neq \phi \vee \dots \vee x_1 \cap z_n \neq \phi) \\ \wedge (x_2 \cap z_1 \neq \phi \vee \dots \vee x_2 \cap z_n \neq \phi) \wedge \dots \\ \wedge (x_m \cap z_1 \neq \phi \vee \dots \vee x_m \cap z_n \neq \phi) \\ \wedge (z_1 \cap x_1 \neq \phi \vee \dots \vee z_1 \cap x_m \neq \phi) \\ \wedge (z_2 \cap x_1 \neq \phi \vee \dots \vee z_2 \cap x_m \neq \phi) \wedge \dots \\ \wedge (z_n \cap x_1 \neq \phi \vee \dots \vee z_n \cap x_m \neq \phi)$$

由

$$(x' \supseteq y_j) \rightarrow (y_j \cap x_1 \neq \phi \wedge y_j \cap x_2 \neq \phi \wedge \dots \wedge y_j \cap x_m \neq \phi)$$

和

$$(y_j \subseteq z') \rightarrow (y_j \cap z_1 \neq \phi \wedge y_j \cap z_2 \neq \phi \wedge \dots \wedge y_j \cap z_n \neq \phi)$$

规则 1 可表示为以下公理的集合:

$$x_1 \cap y_j \neq \phi \wedge (y_j \subseteq z') \rightarrow x_1 \cap z' \neq \phi \\ x_2 \cap y_j \neq \phi \wedge (y_j \subseteq z') \rightarrow x_2 \cap z' \neq \phi \\ \vdots \\ x_m \cap y_j \neq \phi \wedge (y_j \subseteq z') \rightarrow x_m \cap z' \neq \phi \\ z_1 \cap y_j \neq \phi \wedge (x' \supseteq y_j) \rightarrow z_1 \cap x' \neq \phi \\ z_2 \cap y_j \neq \phi \wedge (x' \supseteq y_j) \rightarrow z_2 \cap x' \neq \phi \\ \vdots \\ z_n \cap y_j \neq \phi \wedge (x' \supseteq y_j) \rightarrow z_n \cap x' \neq \phi$$

从而, 规则 1 简化为集合交集公理, 其可靠性得证.

规则 2 表示如下:

$$(x_i \subseteq y') \wedge (y' \subseteq z') \rightarrow x_i \subseteq z' \rightarrow x_i \not\subseteq (Z - z') \equiv (x_i \cap (Z - z') = \phi)$$

$Z - z'$ 为 z' 的补集, 通过子集传递性有 $(x_i \subseteq y') \wedge (y' \subseteq z') \rightarrow x_i \subseteq z'$, 因此 x_i 与 z' 补集的交集必为空集, 从而规则 2 的可靠性得证.

推理系统的完备性证明:

从推理系统的正确性证明中可看出, 规则 1 其实是集合交集公理的等价形式, 因此任何可由该公理推导出的结论也可由规则 1 推导出来.

由集合论有:

$A \subseteq B \subseteq C \rightarrow A \subseteq C \rightarrow A \cap (U - C) = \phi$, 其中 U 为集合全域. 在该系统中, 对象的嵌入空间是等价的, 即 $X = Y = Z = U$. 从而有, $\forall x \in X (x \subseteq Z), \forall z \in Z (z \subseteq X)$.

由规则 2 有:

$(x_i \subseteq y') \wedge (y' \subseteq z') \rightarrow x_i \subseteq z' \rightarrow x_i \cap (Z - z') = \phi$, 其中 Z 为空间全域. 由此, 规则 2 简化为子集传递性公理及其蕴含式, 从而任何可由该公理推导出的结论也可由规则 2 推出.

综上, 推理系统的两条规则都等价于集合论中的基本公理, 因此该系统是关于这些公理及其衍生公理完备的, 从而该系统的完备性得证.

3.2.4 推理系统(关系复合)分析

令 X, Y, Z 分别是简单凹形区域 x, y, z 的嵌入空间, $x' = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\} (x_i \in \{x^0, \partial x, x_i^-, x_0^-\}, 1 \leq m \leq 4, 1 \leq i \leq m)$ 是 X 中子部分的集合, $x' \subseteq X, y_j (1 \leq j \leq 4, y_j \in \{y^0, \partial y, y_l^-, y_0^-\})$ 是 Y 中的子部分, $z' = \{z_1, \dots, z_k, \dots, z_n\} (z_k \in \{z^0, \partial z, z_k^-, z_0^-\}, 1 \leq n \leq 4, 1 \leq k \leq n)$ 是 Z 中子部分的集合, $z' \subseteq Z$. m 和 n 分别表示 x' 和 z' 中子部分的个数, $R_T(a, b)$ 表示 x, z 间的空间关系.

下面分别给出对单个 y_j 应用规则 1, 对单个 x_i 应用规则 2 以及对 Y 中每个 y_j 应用规则 1 后的关系复合情况.

(1) 对 y_j 应用规则 1 得到的非空交集关系复合分为四种情况, 即:

推论 1 若 $(m = 1 \vee n = 1)$, 则推出 X, Z 间的非空交集关系是一个确定关系集合.

推论 2 若 $(1 < m \leq 4 \wedge 1 < n \leq 4) (m, n$ 不同时为 4), 则推出 X, Z 间的非空交集关系是一个由关系析取式组成的不确定关系集合.

推论 3 若 $(m = 1 \wedge n = 1 \wedge x' = \{x_0^-\} \wedge z' = \{z_0^-\})$, 则推出 X, Z 间的非空交集关系为第一种一般约束.

推论 4 若 $(m = 4 \wedge n = 4)$, 则推出 X, Z 间的非空交集关系为第二种一般约束.

(2)对 x_i 应用规则 2 得到的空交集关系复合分为两种情况,即:

推论 5 若 $(1 \leq l < 4 \vee 1 \leq n < 4)$, 则推出 X, Z 间的空交集关系是一个确定关系的集合。

推论 6 若 $(l = 4 \vee n = 4)$, 则 X, Z 间不产生空交集传播。

(3)对 Y 中每个 y_j 应用规则 1 后,非空交集关系的复合可以大致分为以下三种,即:

推论 7 若对于所有 y_j 都有推论 1 成立,推出的空间复合关系 $R_T(a, b)$ 是唯一确定的。

推论 8 若对于所有 y_j 都有推论 2 成立,推出的空间复合关系 $R_T(a, b)$ 是一个由关系析取式组成的不确定关系集合。

推论 9 若对于所有 y_j 都有推论 3 或推论 4 成立,推出的空间复合关系 $R_T(a, b)$ 是全域关系(即 RCC62)。

3.2.5 RCC62 复合关系的推导

空间关系推理普遍采用的形式是复合表。1993 年, Cui 等^[9]给出了 RCC8 的复合表, Egenhofer^[8]利用子集的传递性质,也给出八种基本二元关系的复合表。2001 年 Duntsch^[10]指出定性时空推理中使用的复合表概念实际上是弱复合表。2003 年, Li 等^[11]指出 Egenhofer 给出的八种二元基本拓扑关系的复合表与 RCC8 的弱复合表是一致的。

基于 Egenhofer 的推理思想,我们利用子集关系的传递性质建立了 RCC62 的推理系统,在此基础上可推导出 RCC62 的复合表,且该复合表与 RCC8 的弱复合表是一致的。下面所提到的 RCC62 的复合关系都是指弱复合关系。

举例说明 RCC62 复合关系的推导。

例 1 a, b, c 是三个简单凹形区域,已知 a, b 间的拓扑关系 $R_T(a, b)$ 及 b, c 间的拓扑关系 $R_T(b, c)$, 推导出 a, c 间可能的拓扑关系 $R_T(a, c)$, 如表 2 所示。

复合关系 $R_T(a, c)$ 的推导过程如下:

(1)对 $b_j (1 \leq j \leq 4, b_j \in \{b^{\circ}, \partial b, b_j^-, b_j^-\})$ 应用规则 1, 产生非空交集传播如下:

对 b° 有:

$$\{a^{\circ}\} \supseteq b^{\circ} \wedge b^{\circ} \subseteq \{c^{\circ}, c_j^-\} \rightarrow a^{\circ} \cap c_j^- \neq \phi$$

对 ∂b 有:

$$\{a^{\circ}, \partial a\} \supseteq \partial b \wedge \partial b \subseteq \{c^{\circ}, \partial c, c_j^-\} \rightarrow (a^{\circ} \cap c^{\circ} \neq \phi \vee \partial a \cap c^{\circ} \neq \phi) \wedge (a^{\circ} \cap \partial c \neq \phi \vee \partial a \cap \partial c \neq \phi) \wedge (a^{\circ} \cap c_j^- \neq \phi \vee \partial a \cap c_j^- \neq \phi)$$

对 b_j^- 有:

$$\{a_j^-\} \supseteq b_j^- \wedge b_j^- \subseteq \{c^{\circ}, \partial c, c^{\circ}, c_j^-\} \rightarrow a_j^- \cap c^{\circ} \neq \phi \wedge a_j^- \cap \partial c \neq \phi \wedge a_j^- \cap c^{\circ} \neq \phi \wedge a_j^- \cap c_j^- \neq \phi$$

对 b_j^+ 有:

$$\{a^{\circ}, \partial a, a_j^-, a_j^+\} \supseteq b_j^+ \wedge b_j^+ \subseteq \{c_j^+\} \rightarrow a_j^- \cap c_j^+ \neq \phi \wedge \partial a \cap c_j^+ \neq \phi \wedge a^{\circ} \cap c_j^+ \neq \phi \wedge a_j^- \cap c_j^+ \neq \phi$$

(2)对 $a_i (1 \leq i \leq 4, a_i \in \{a^{\circ}, \partial a, a_i^-, a_i^-\})$ 应用规则 2, 产生空交集传播如下:

对 a° 有:

$$a^{\circ} \subseteq \{b_j^+ \mid \{b_j^+\} \subseteq \{c_j^+\}\} \rightarrow a^{\circ} \cap \partial c = \phi \wedge a^{\circ} \cap c^{\circ} = \phi \wedge a^{\circ} \cap c_j^- = \phi$$

对 ∂a 有:

$$\partial a \subseteq \{b_j^+, \partial b\} \wedge \{b_j^+, \partial b\} \subseteq \{c_j^+, \partial c, c_j^-\} \rightarrow \partial a \cap c^{\circ} = \phi$$



对 a_j^- 有:

$$a_j^- \subseteq \{b_j^+ \mid \{b_j^+\} \subseteq \{c_j^+\}\} \rightarrow a_j^- \cap \partial c = \phi \wedge a_j^- \cap c^{\circ} = \phi \wedge a_j^- \cap c_j^- = \phi$$

对 a_j^+ 有:

$$a_j^+ \subseteq \{b_j^+, \partial b, b^{\circ}, b_j^-\} \wedge \{b_j^+, \partial b, b^{\circ}, b_j^-\} \subseteq \{c_j^+, \partial c, c^{\circ}, c_j^-\}, \text{此时无空交集传播。}$$

表2 已知 $R_T(a, b)$ 和 $R_T(b, c)$, 推导出可能的 $R_T(a, c)$

$R_T(a, b),$ $R_T(b, c)$	a, c 的 16-交集矩阵	$R_T(a, c)$	
$R_T(a, b)$ 为 R_{15}  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & - & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	可能为 R_1	无对应 拓扑关系 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
$R_T(b, c)$ 为 R_{25}  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		可能为 R_{15}	无对应 拓扑关系 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

应用两种规则后,同时存在确定和不确定的复合关系,推导出 a, c 的 16-交集矩阵(如表 2 所示),其中横线处就是不确定关系,元素可取值为 0 或 1。考虑 a, c 的 16-交集矩阵中两元素所有可能的取值组合,得到四个确定的矩阵,其中两个分别对应 RCC62 中的关系 R_1 和 R_{15} ,另外两个无对应关系。因此,我们推导出 $R_T(a, c)$ 为 R_1 或 R_{15} ,如表 2 所示。

同理,用以上方法进行 RCC62 复合关系的推导,最终可以得到 RCC62 的复合表。由于该复合表共包含 $62 \times 62 = 3844$ 项,每项最多可能包含 62 种关系,十分繁复,因此文中不便具体给出 RCC62 复合表的所有项。

4 结束语

本文为了表示二维平面内简单凹形区域间的空间关系,将 9-交集矩阵扩展为 16-交集矩阵;基于 16-交集矩阵,在 RCC23 的基础上得到 RCC62,比 RCC23 的表达力更强;给出 RCC62 的概念邻域图和最近拓扑关系图,描述了 RCC62 的渐变关系;建立了 RCC62 的推理系统,包括三种约束条件和两种推理规则,给出了 RCC62(弱)复合表构造的推导过程。

参考文献:

- [1] 虞强源,刘大有,欧阳继红.基于区间值模糊集的模糊区域拓扑关系模型[J].电子学报,2005,33(1):186-189.
Yu Qiangyuan, Liu Dayou, Ou Yang Jihong. Topological relations model of fuzzy regions based on interval valued fuzzy sets [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 186-189. (in Chinese)
- [2] Randell DA, Cui Z, Cohn AG. A spatial logic based on regions and connection[A]. Nebel B. Proc of the 3rd Int Conf on Principles of Knowledge Representation and Reasoning[C]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1992. 165-176.
- [3] Egenhofer MJ, Franzosa RD. Point-set topological spatial relations[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(2): 161-174.
- [4] Egenhofer MJ, Herring JR. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic database[R]. Orono: University of Maine, 1991.
- [5] Cohn AG. A hierarchical representation of qualitative shape based on connection and convexity[A]. Frank A. Proc of the Int Conf on Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS[C]. Berlin/Heidelberg: Springer, 1995. 311-326.
- [6] El-Geresy BA, Abdelmoty AI. Order in space: a general formalism for spatial reasoning[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 1997, 6(4): 423-450.
- [7] Freksa C. Temporal reasoning based on semi-intervals[J]. Artificial Intelligence, 1992, 54: 199-227.
- [8] Egenhofer MJ, Al-Taha K. Reasoning about gradual changes of topological relationships[A]. Frank A. Theories and models of spatio-temporal reasoning in geographic space[C]. Berlin/Heidelberg: Springer, 1992. 196-219.
- [9] Cui Z, Cohn AG, Randell DA. Qualitative and topological relationships in spatial databases[A]. Abel D. Advances in Spatial Databases[C]. Berlin: Springer, 1993. 293-315.
- [10] Duntsch I, Wang H, McCloskey S. Relation algebras in spatial reasoning[A]. Orlowska E. Extended Abstracts of the 4th Seminar on Relational Methods in Algebra, Logic, and Computer Science[C]. Heidelberg: Physica-Verlag, 1998. 63-68.
- [11] Li S, Ying M. Region connection calculus: its models and composition table[J]. Artificial Intelligence, 2003, 145(1-2): 121-146.

作者简介:

欧阳继红 女,1964 年生于吉林长春.现为吉林大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师.主要研究方向:空间推理,不确定性推理, GIS 应用. E-mail: ouyangjihong@yahoo.com.cn

富倩 女,1981 年出生于贵州毕节.现为吉林大学计算机科学与技术学院博士生.主要研究方向:空间推理.

刘大有(通讯作者) 男,1942 年出生于河北乐亭.现为吉林大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师.主要研究方向:知识工程与专家系统,空间推理等. E-mail: liudy@jlu.edu.cn