

# 有向线对象细节拓扑关系模型

王生生<sup>1</sup>, 王兆丹<sup>1</sup>, 刘大有<sup>1</sup>, 李 昕<sup>2</sup>, 张慧杰<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 软件学院, 长春 130012; 3. 东北师范大学 计算机学院, 长春 130117)

**摘 要:** 针对运动轨迹等有向线对象的特点, 提出了细节拓扑关系模型, 以解决现有模型不能区分复杂细节的问题。首先基于空间推理中4交模型的方法, 定义了DLO矩阵。进而根据交分量的类型, 对DLO进行细化, 给出空间语义更丰富的DDLO模型。对比分析显示, 与HBT等现有经典模型相比, DDLO模型能够精确描述有向线对象多次相交的细节, 能区分相交与相切, 而HBT模型只能分辨固定的68种简单关系。

**关键词:** 人工智能; 时空推理; 有向线对象; 拓扑关系细节模型

**中图分类号:** TP182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)05-1292-05

## Detailed topological relation model of directed line objects

WANG Sheng-sheng<sup>1</sup>, WANG Zhao-dan<sup>1</sup>, LIU Da-you<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, ZHANG Hui-jie<sup>3</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. Software College of Jilin University, Changchun 130012, China; 3. College of Computer Science, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

**Abstract:** According to the characteristics of directed line objects, such as track, a detailed topological relation model is proposed, thus the complex details can be captured. First, DLO matrix is defined based on the 4-intersection method of spatial reasoning. Then, by apply the intersection types to DLO, the DDLO model with rich spatial semantics is obtained. Finally, the analysis and comparison with classical models (HBT etc.) show that DDLO can precisely describe the detailed intersection of directed line objects and distinguish intersection and tangency, while HBT can only distinguish fixed 68 simple relations.

**Key words:** artificial intelligence; spatio-temporal reasoning; directed line objects; detailed topological relation model

时空推理是指对占据空间并随时间变化的对象所进行的推理, 在人工智能、地理信息系统、图理解等众多领域受到较多关注<sup>[1-2]</sup>。空间拓扑关系模型是时空推理研究的核心内容。区域和线

是两种最常见的空间对象, 区域拓扑模型的研究工作较多, 如RCC模型<sup>[3]</sup>, 线拓扑关系模型研究较少, 并且很多模型是由区域模型扩充而来。近年来, 随着基于位置的服务(LBS)等移动通讯技

收稿日期: 2008-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60603030, 60773099); “863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA10Z245); 吉林省科技发展计划重点项目(20060213); 欧盟项目TH/Asia Link/010(111084); 东北师范大学自然科学基金青年基金项目。

作者简介: 王生生(1974-), 男, 教授, 研究方向: 时空推理. E-mail: wss@jlu.edu.cn

通信作者: 刘大有(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 知识工程, 时空推理. E-mail: dyliu@jlu.edu.cn

术的普及,对运动轨迹(一种有向线对象)处理的需求日渐加强,特别是有向线拓扑关系的研究开始受到重视。有向线对象描述有向线状实体,如道路、河流、移动对象运动轨迹等<sup>[4-5]</sup>。1993 年, Clementini 等<sup>[6]</sup>在 4-交叉扩展模型上找到了 18 种关于无向线段的线线关系。1994 年, Egenhofer<sup>[7]</sup>在二维空间中给出了无向线段形式化的 33 种拓扑关系。1995 年, Egenhofer 等<sup>[8]</sup>提出了针对区域-区域拓扑关系的拓扑不变性。1998 年, Clementini 等<sup>[9]</sup>也提出了针对线-线拓扑关系的拓扑不变性。2006 年, Kurata 等<sup>[10]</sup>针对有向线对象间的空间关系,提出了 HBT 交模型,把有向线对象分为 Head、Body 和 Tail 三个部分,应用 3 \* 3 的交集矩阵,给出了 68 种拓扑关系。目前为止, HBT 交模型被认为是最好的同类模型。但也存在一些问题:①HBT 交模型只适于有向线对象间只有一次相交的简单拓扑关系的描述,不能描述有向线对象间存在的多次相交的复杂拓扑关系。②在两个有向线对象相切、相交等情况时, HBT 模型不能进行区分描述,只能用同一个矩阵来表示。

存在以上问题的原因是 HBT 模型只能描述简单的情况。表达更复杂的拓扑关系需要对线相交的细节进行刻画。本文针对以移动对象运动轨迹为代表的有向线对象特点,定义了一个 DLO (Directed line object) 矩阵,它能够描述有向线对象间多次相交的细节,进而给出描述有向线对象细节拓扑关系的 DDLO (Detail of directed line object) 模型。

1 有向线对象拓扑关系细节模型

定义 1 一个有向线对象是由两个不同的点和一条连接这两个点、不自交、连续的、有方向的线(折线或者曲线)组成的。本文用箭头的方向表示这个有向线对象的方向。

针对移动对象运动轨迹的特点,把箭头表示的点看作是某一时刻移动对象运动的终点,把非箭头表示的点看作是某一时刻移动对象运动的起点,并默认地把这个起点的非箭头方向的切线延长线作为这个移动对象曾经的运动轨迹。

下面定义一个 DLO 矩阵,用来表示两个有向线对象的拓扑关系。

定义 2 设  $X$  表示一个有向线对象,  $X^0$  为  $X$  箭头所表示的点,称为方向点(以下简称为  $O$

点),  $\partial X$  是  $X$  的其余部分,称为内部。那么,有向线对象  $A$ 、 $B$  拓扑关系的 DLO 矩阵为

$$M(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于矩阵(1),考虑其中的 4 个交集是否为空。如果一个交集为空,在对应的位置写 1,否则写 0。由有向线对象  $A$ 、 $B$  拓扑关系的 DLO 矩阵,可以得到  $2^4 = 16$  个矩阵

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\ M_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; M_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ M_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; M_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; M_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ M_{10} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; M_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\ M_{13} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{14} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; M_{15} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \\ M_{16} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定理 1 上述 16 个矩阵中,  $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$ 、 $M_{14}$ 、 $M_{15}$ 、 $M_{16}$  不满足定义 1 有向线对象的定义。

证明 用反证法证明  $M_6$  没有意义。假设有向线对象  $A$  不封闭,则  $A^{\circ} \cap \partial A = 0$ 。而由  $M_6$ ,有  $A^{\circ} \cap \partial B = 1$  和  $\partial A \cap \partial B = 1$ ,于是可以得到  $A^{\circ} \cap \partial A = 1$ 。矛盾。假设不成立,即有向线段  $A$  为封闭的。

根据定理 1,  $M_6$  没有意义。同理可证  $M_7$ 、 $M_8$ 、 $M_{14}$ 、 $M_{15}$ 、 $M_{17}$  均没有意义。

由于本文主要研究以移动对象运动轨迹为代表的有向线对象的拓扑关系问题,把非箭头表示的点看作是某一时刻移动对象运动的起点,并默认地把这个起点的切线延长线作为这个移动对象曾经的运动轨迹。那么,图 1 中的两个图在本文中可以看作同一情况。

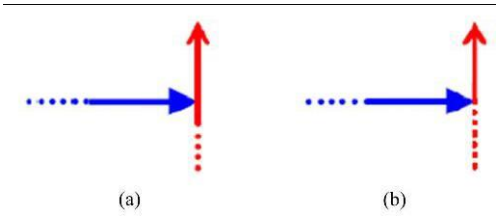


图 1 A、B 间拓扑关系的两种情况

Fig 1 Two cases of the topological relationships between A and B

1.1 两个有向线对象间内部无交分量拓扑关系

两个有向线对象间内部无交分量, 即当  $A^\circ \cap B^\circ = 0$  时, 有  $M_1 \sim M_5$ 。由于每个有向线对象都只有一个  $O$  点, 并且两个有向线对象的内部无交分量, 所以  $M_1 \sim M_5$  均可以唯一地描述两个有向线对象间的拓扑关系, 如图 2 所示。

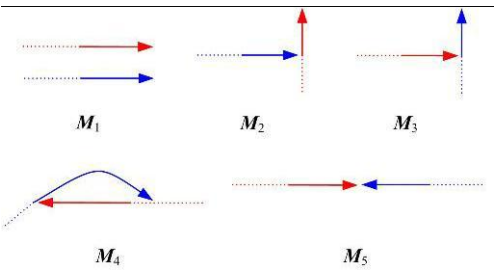


图 2  $M_1 \sim M_5$  所描述的拓扑关系

Fig. 2 Topological relationships of  $M_1 \sim M_5$

1.2 两个有向线对象间内部有交分量拓扑关系

两个有向线对象间内部有交分量, 即当  $A^\circ \cap B^\circ = 1$  时, 有  $M_6 \sim M_{13}$ 。虽然, 这些矩阵也能够一定程度上区分有向线对象的拓扑关系, 但由于两个有向线对象的内部可以有  $N$  个交分量, 所以它们所表示的两个有向线对象间的拓扑关系并不唯一。在实际应用中, 需要更多的拓扑细节描述来满足对空间分析和查询的需求。

1996 年, Breunig<sup>[10]</sup> 提出空间元素的拓扑关系可以通过它邻域的空间所辨识。所以, 本文给出定义 3。

定义 3 记有向线对象  $X$  箭头方向的左侧为  $LeftX$ , 简称为  $LX$ , 记  $X$  箭头方向的右侧为  $LX^-$  (见图 3)。考虑有向线对象  $A, B$  的交点, 以交点为圆心, 以无穷小正数  $\epsilon$  为半径画一个圆 (即邻域), 用邻域空间 (不包括  $A, B$  自身围成的邻域空间) 来描述  $P, R$  交点。如图 4 中的  $P, R$  两点就可以表示为

$P: LA \cap LB, LA \cap LB^-, LA^- \cap LB, LA^- \cap LB^-$   
 $R: LA \cap LB, LA^- \cap LB$

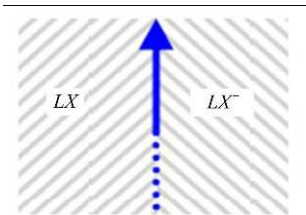


图 3 线方向

Fig. 3 Line direction

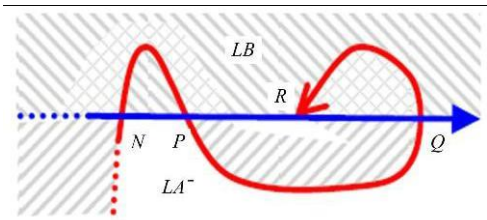


图 4 线方向示例

Fig. 4 Example of line direction

表 1 交点的 10 种类型

Table 1 Ten types of points of intersection

	$LA \cap LB$	$LA^- \cap LB$	$LA \cap LB^-$	$LA^- \cap LB^-$	图例
$P_0$	✓				
$P_1$				✓	
$P_2$		✓			
$P_3$			✓		
$P_4$	✓	✓			
$P_5$	✓		✓		
$P_6$		✓		✓	
$P_7$			✓	✓	
$P_8$	✓	✓	✓	✓	
$P_9$		✓	✓		

根据定义 3, 对有向线对象间能够出现的交点进行归类, 如表 1 所示, 可以得到 10 种不同的点。这些聚类点的完备性如下: 以 4 个邻域类型来区分交点的类型, 一共有  $C_4^1 + C_4^2 + C_4^3 + C_4^4 = 15$  种。而根据交点的实际情况, 一个交点的邻域或者是 4 个邻域, 或者是 2 个邻域, 不可能出现 3 个邻域或 1 个邻域的情况。当 2 个有向线对象出现相接时, 这个切点的 2 个邻域的性质是相同的, 则只用 1 个邻域来判断这个点的性质即可。所以在仅考虑邻域类型的情况下, 存在的交点的类型为  $C_4^1 + C_4^2 + C_4^4 = 11$  种。  $LA^- \cap LB^-$  和  $LA \cap LB$  这种情况用于表示图 1(b) 中未加入延长线时的交

点, 根据定义 1 对于移动对象运动轨迹的定义, 使得  $LA^- \cap LB^-$  和  $LA \cap LB$  不可能出现在表 1 中。所以, 表 1 有 10 种不同的点, 即  $P_0 \sim P_9$ 。

在能够出现的拓扑关系中, 不但要考虑交点, 还需考虑重叠的线段, 本文将其称为交线段, 如图 5 中的线段  $MN$ 。

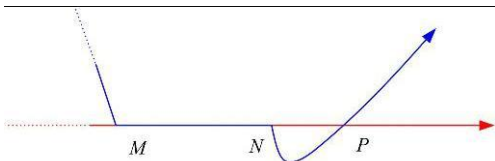


图 5 有重叠的拓扑关系

Fig. 5 Collapsed topological relationships

有向线对象的重叠情况可以分为正向重叠和逆向重叠。其中正向重叠就是两个对象的方向在重叠部分是一致的, 反之就是逆向重叠。

首先, 只考虑对象  $A$  的方向, 不考虑对象  $B$  的方向, 那么对能够出现的交线段进行分析, 得到 9 种不同类型的交线段, 如表 2 所示。当考虑对象  $B$  的方向时, 就存在  $9 \times 2 = 18$  种不同类型的交线段。如果  $A$  与  $B$  是正向重叠, 那么用  $l_i$  表示, 如果是逆向重叠, 则用  $-l_i$  表示。

表 2 交线段的 9 种类型

Table 2 Nine types of line segments of intersection

交线段类型	图例	交线段类型	图例
$l_0$		$l_5$	
$l_1$		$l_6$	
$l_2$		$l_7$	
$l_3$		$l_8$	
$l_4$			

当  $A^\circ \cap B^\circ = 1$  时, 应用 DLO 矩阵, 可以在一定程度上判断有向线对象  $A, B$  的拓扑关系。可是, 当有向线对象  $A, B$  存在多次交的情况时, DLO 矩阵无法满足对细节判断的需求。于是, 本文给出以下方法:

(1) 以有向线对象  $A$  为参考对象, 从它的  $O$  点开始跟踪交分量, 并依次标识为  $0, 1, \dots, n-1$ , 一直跟踪到对象  $A$  的另一个端点结束。

(2) 以  $B$  为参考对象, 从它的  $O$  点开始跟踪

交分量, 记下所遇到的标识号, 并参照表 1 和表 2 依次给出交分量的表示。

将 DLO 矩阵模型进行改进, 把  $A^\circ \cap B^\circ = 1$  用所有交分量的序列进行表示, 这样可以得到一个新的模型, 称为 DDLO 模型。

2 实例及对比分析

2.1 实例

以图 6 为例, 应用本文的 DDLO 模型, 按以下步骤能描述有向线对象  $A, B$  的细节拓扑关系。

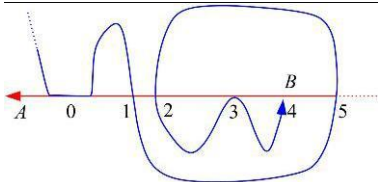


图 6  $A, B$  间多次相交的示例

Fig. 6 Example of many intersections between  $A$  and  $B$

(1) 定义图 6 中任意一个有向线对象为  $A$ , 另一个为  $B$ 。根据 DLO 矩阵, 可以得到  $[0, 0, 0, 1]$ 。

(2) 由于  $A^\circ \cap B^\circ = 1$ , 以有向线对象  $A$  为参考对象, 从它的  $O$  点开始跟踪交分量, 一直跟踪到对象  $A$  的另一个端点结束, 并依次标识为  $0, 1, \dots, 5$ 。

(3) 以有向线对象  $B$  为参考对象, 从它的  $O$  点开始跟踪交分量, 记下所遇到的标识号, 并参照表 1 和表 2 依次给出交分量的序列表示。

最终得到  $A, B$  的细节拓扑关系为:  $[0, 0, 0, 4(P_5), 3(P_0), 2(-P_8), 5(P_0), 1(-P_8), 0(-l_5)]$ 。

这种表示方法显然比 HBT 等模型提供了更多的拓扑关系信息, 因而能区分更细致的拓扑关系。

2.2 对比分析

表 3 对比了 DDLO 模型和同类模型的主要指标。

表 3 DDLO 模型与其他模型的比较

Table 3 Comparison of the models

模型	是否有向	是否有细节描述
DDLO 模型	是	是
HBT 模型 <sup>[10]</sup>	是	否
Clementini 模型 <sup>[6]</sup>	否	否
Egenhofer 模型 <sup>[7]</sup>	否	否

此前普遍认为 HBT 模型是较好的有向线对象模型。本文的 DDLO 模型与 HBT 模型相比，增加了对拓扑关系细节信息的描述，其具体优点如下：

(1) DDLO 模型不但能够准确地描述出每一个交分量的类型，并且能够按照顺序表示出来。而 HBT 交模型并不能描述有向线对象间存在的多次相交的复杂拓扑关系。如图 6 所示，HBT 模型

只能用  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  来描述，而应用 DDLO 模型

可以得到  $A、B$  的拓扑关系可以描述为： $[0, 0, 0, 4(P_5), 3(P_0), 2(-P_8), 5(P_0), 1(-P_8), 0(-I_5)]$ 。

(2) DDLO 模型可以区分有向线对象间相切、相交等情况。如图 7 中的 7 种情况，DDLO 模型可以得到 7 种不同的表示：

$[0, 0, 0, P_8]; [0, 0, 0, -P_8]; [0, 0, 0, -P_8];$   
 $[0, 0, 0, I_5]; [0, 0, 0, -I_5];$   
 $[0, 0, 0, 1(P_8), 0(-P_8)];$   
 $[0, 0, 0, 0(-P_8), 1(P_8)]$ 。

而 HBT 模型只能用同一个矩阵来表示，即

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

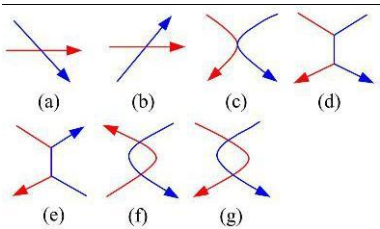


图 7  $A、B$  间的一些拓扑关系示例

Fig 2 Example of some topological relationships between  $A$  and  $B$

4 结束语

本文针对移动对象运动轨迹的特点，面向有向线对象间拓扑关系，定义了一个 DLO 矩阵。根据交分量的类型 DLO 矩阵进行了改进，给出描述有向线对象间拓扑关系的 DDLO 模型。与 HBT 等现有模型相比，DDLO 模型能够描述有向线多次相交的细节，能够区分相交与相切，从而可以表达更复杂的拓扑关系。DDLO 模型也适用于

无向线拓扑关系。本文的后续研究工作将考虑与线面拓扑关系<sup>[11]</sup>相结合，从而提出表达能力更强的模型，同时研究线、面拓扑关系的定性约束满足问题。

参考文献：

[ 1 ] Cohn A G, Hazarika S M. Qualitative spatial representation and reasoning: an overview[ J] . Fundamental Informatics, 2001, 46 ( 1/ 2): 1-29.

[ 2 ] Escrig M Teresa, Toledo Francisco. Qualitative Spatial Reasoning: Theory and Practice[ M] . The Netherlands: IOS Press, 1999.

[ 3 ] Randell D, Cui Z, Cohn A. A spatial logic based on regions and connection[ C] //In Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, Morgan Kaufmann, 1992.

[ 4 ] Kurata Y, Egenhofer M. Structure and semantics of arrow diagrams[ C] //COSIT 05, Ellicottville, NY, 2005.

[ 5 ] Kurata Y, Egenhofer M. Topological relations of arrow symbols in complex diagram[ C] //Fourth International Conference on the Theory and Application of Diagrams, Stanford, CA, 2006.

[ 6 ] Clementini E, di Felice P, van Oosterom P. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction[ C] //Third International Symposium, SSD93, Singapore, 1993.

[ 7 ] Egenhofer M. Definitions of line-line relations for geographic databases[ J] . IEEE Data Engineering Bulletin, 1994, 16(3): 40-45.

[ 8 ] Egenhofer M, Franzosa R. On the equivalence of topological relations[ J] . International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9( 2): 133-152.

[ 9 ] Clementini E, di Felice P. Topological invariants for lines[ J] . IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1998, 10(1): 38-54.

[ 10 ] Yohei Kurata, Max Egenhofer. The head-body-tail intersection for spatial relations between directed line segments[ C] //Geographic Information Science, Münster, Germany, 2006.

[ 11 ] 欧阳继红, 马宝超, 刘大有, 等. 空间线面拓扑关系的推理[ J] . 吉林大学学报: 理学版, 2007, 45(4): 567-571.

Oyang Ji-hong, Ma Bao-chao, Liu Da-you, et al. Reasoning of topological relations between spatial line and region[ J] . Journal of Jilin University (Science Edition), 2007, 45(4): 567-571.