

一种有向线间拓扑关系与方向关系的集成表达模型

吴 静¹ 邓 敏^{1, 2} 刘慧敏¹

(1 中南大学地理信息系,长沙市麓山南路 932 号,410083)

(2 湖南省地理空间信息工程技术研究中心,长沙市韶山中路 693 号,410083)

摘 要:针对二维欧氏空间内有向线的特点,将有向线对象区分为起点、内部和边界,建立了有向线对象之间拓扑关系与方向关系集成表达的 DLR 模型,并给出了一个具体应用实例。与现有模型进行对比分析发现,DLR 模型不仅能描述二维空间中有向线对象之间的方向关系,还能够有效地区分相离、内部相交、相切、部分覆盖等拓扑关系,从而提高了有向线对象之间空间关系的区分能力。

关键词:有向线;拓扑关系;方向关系

中图分类号:P208

空间关系可根据空间约束的几何类型,分为拓扑、方向和度量关系等三个类型。目前,拓扑关系的研究成果相对较多,尤其是拓扑关系描述模型,具有代表性的 4 交模型^[1]、9 交模型^[2]、4 交差模型^[3]和 RCC 模型^[4]等。与拓扑关系相比,方向关系无疑是更贴近人们生活,用途更广泛的一种空间关系,是时空数据库中的数据与自然语言的一种有效链接手段^[5],具有代表性的方向关系描述模型主要有锥形模型^[6]、投影模型^[7]、方向关系矩阵模型^[8]、双十字模型^[9]等。度量关系可用于描述空间对象之间的接近程度和相似程度,通过“拓扑关系+度量参数”的形式可建立自然语言空间关系描述与图形空间关系的联系^[10]。

在地理数据库中,有向线是表达有方向的线性实体的基本几何要素,如单行线、河流、移动对象运动轨迹等。随着 GPS、移动通讯技术等的高速发展,对移动对象运动轨迹的分析处理需求日益增强^[11],有向线空间关系的研究对提高移动对象运动轨迹的表达、分析及推理能力具有重要意义。目前,对有向线空间关系的研究通常是分别对已有的拓扑关系模型或方向关系模型进行扩展,但单独考虑拓扑关系或方向关系不能有效区分有向线之间的空间关系。本文综合考虑有向线之间的拓扑关系和方向关系,对有向线之间的定性空间关系进行形式化描述。

1 有向线拓扑关系模型

1.1 有向区间代数

在一维空间中,线对象可以视为一个由两个端点组成的区间。有向区间可以表示空间对象的内部方位、移动的方向等,其长度也可以表示对象之间的距离或移动对象的速度。例如,在道路网中的车辆运行轨迹可以视为特殊的一维线对象,抽象为有向区间,用于表示车辆运行的轨迹、安全区域或刹车距离等。Renz 在区间代数^[12]的基础上添加了相同方向和相反方向,定义了有向区间代数(DIA)^[13]的 26 种 JEPD 基本关系,将其用于道路网中车辆移动轨迹的表达和推理。但 DIA 只能描述一维空间中有向线对象的起点和终点之间的相互关系,却无法表示两者之间的内部关系,也不能描述在二维空间中的移动轨迹。

1.2 交集模型

交集模型基于点集拓扑学理论,将一个空间对象分解为内部和边界,通过对象之间点集拓扑分量的组合关系来描述和区分拓扑关系。Kurat^[14]基于 9 交模型,将有向线对象 X 的起点(tail)和终点(head)分别作为边界 $\partial_{\text{tail}} X$ 和 $\partial_{\text{head}} X$,起点和终点之间的连线作为内部 X° ,建立 HBT(head-body-tail)模型:

收稿日期:2013-06-25。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41171351,40871180);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012zzts008)。

$$M_I(A, B) = \begin{bmatrix} \partial_{tail}A \cap \partial_{tail}B & \partial_{tail}A \cap B^\circ & \partial_{tail}A \cap \partial_{head}B \\ A^\circ \cap \partial_{tail}B & A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial_{head}B \\ \partial_{head}A \cap \partial_{tail}B & \partial_{head}A \cap B^\circ & \partial_{head}A \cap \partial_{head}B \end{bmatrix} \quad (1)$$

虽然 HBT 模型可区分 $2^9 = 512$ 种拓扑关系, 但实际只有 68 种拓扑关系具有意义。从自然语言空间关系的角度定义了 10 类基本的有向线之

间的拓扑关系(图 1), 其他复杂的有向线之间的关系可以通过组合基本的有向线之间的拓扑关系得到。但 HBT 模型不能有效区分两个有向线对象的拓扑关系为相离或内部相交的情况。如图 2 所示, HBT 模型将三种不同的相离关系均表示

为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 无法区分有向线间各种不同的方位

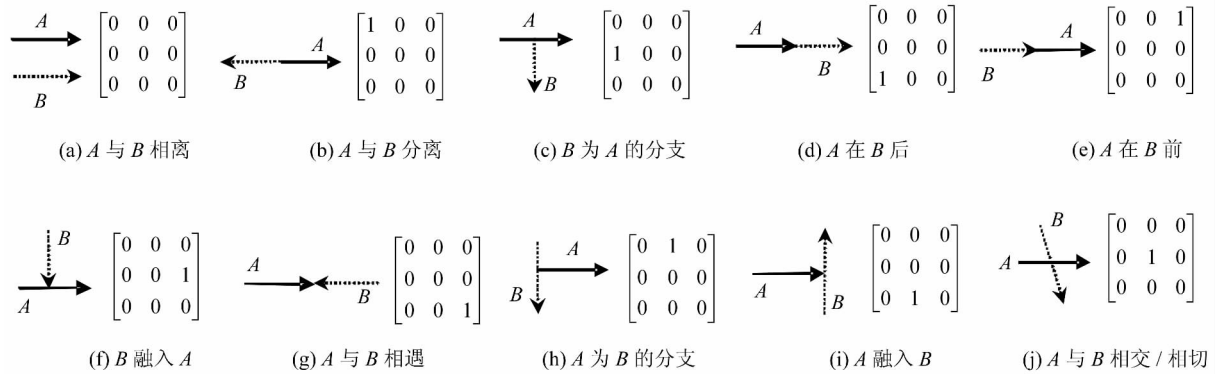


图 1 HBT 模型定义的基本拓扑关系

Fig. 1 Basic Topological Relations Defined by the HBT Model

关系。如图 3 所示, HBT 模型将有向线对象内部与内部之间存在的相交、相切、部分重叠、多次相交等情况均表示为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。为解决 HBT 模型不能区分有向线内部具有交分量的情形, 王生生等^[15]基于 4 交模型定义了描述有向线对象之间细节拓扑关系的 DDLO 模型, 但需要结合相应的

图例才能区分有向线间多次相交的细节拓扑关系。

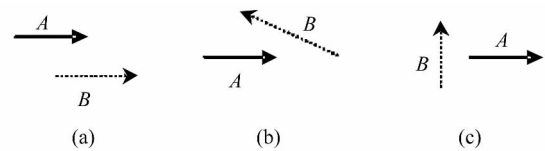


图 2 HBT 模型不能区分的相离关系
Fig. 2 Disjoint Relations not Being Distinguished by the HBT Model

图例才能区分有向线间多次相交的细节拓扑关系。

型不能区分有向线内部具有交分量的情形, 王生生等^[15]基于 4 交模型定义了描述有向线对象之间细节拓扑关系的 DDLO 模型, 但需要结合相应的

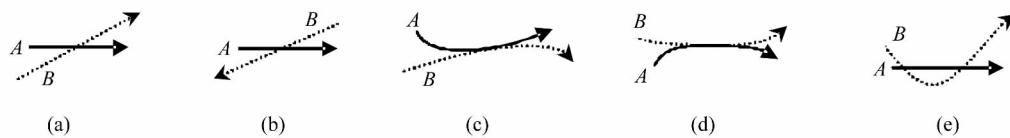


图 3 HBT 模型不能区分的内部相交关系

Fig. 3 Cross Relations not Being Distinguished by the HBT Model

2 有向线方向关系模型

描述对象之间的方向关系首先需要考虑参考框架的选择, 使用不同的参考框架将得到不同的方向关系描述。在有向线的方向关系描述中, 更侧重于表达有向线对象的相对方向, 因此, 选择内部参考框架进行描述。采用内部参考框架描述方向关系的经典模型有双十字模型^[9]、方向代数模型^[16]和 DRA 模型^[17], 其中前两种模型描述的是

有向线与点对象之间的方向关系, 而 DRA 模型通过判断二维空间中有向线 B 的起点 s_B 和终点 e_B 相对于有向线 A 的方向关系, 以及有向线 A 的起点 s_A 和终点 e_A 相对于有向线 B 的方向关系, 来描述有向线对象之间的方向关系:

$$A R_1 s_B \wedge A R_2 e_B \wedge B R_3 s_A \wedge B R_4 e_A \quad (2)$$

其中, 点与有向线之间的方向关系为(图 4): 位于有向线的左侧(l); 位于有向线的右侧(r); 位于有向线的正后方(b); 与有向线的起点重合(s); 位于有向线的内部(i); 与有向线的终点重合(e); 位于

有向线的正前方(f)。当 $R \in \{l, r, s, e\}$ 时,即考虑点位于有向线的左侧、右侧以及有向线起点或终点重合的关系,得到具有 24 种原子关系的 $DRA_c^{[18]}$;当 $R \in \{l, r, b, s, i, e, f\}$ 时,得到具有 72 种原子关系的 DRA_f 。

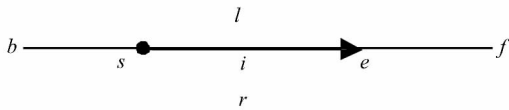


图 4 有向线与点之间的方向关系

Fig. 4 Directional Relations Between a Directed Line and a Point

3 有向线拓扑与方向关系集成表达模型

3.1 DLR(Directed Line Relation)模型

本文将有向线定义为一条由起点指向终点的、连续的、不自交的线(直线或者曲线)。在描述有向线之间的空间关系时,若单独使用拓扑关系或者方向关系均只能描述简单情况,而无法刻画有向线之间的细节空间关系。因此,本文综合考虑有向线之间的拓扑关系和方向关系,任意选取一条有向线为参考对象,将另一条有向线作为目标对象,并将其划分为起点、内部和终点,建立三元组 DLR 模型,对有向线之间的空间关系进行形式化描述,即:

$$DLR(A, B) = (AR_1 \partial_{tail} B, AR_2 B^\circ, AR_3 \partial_{head} B) \quad (3)$$

式中, $DLR(A, B)$ 为有向线 A 和 B 之间的空间关系;有向线 A 为参考对象; B 为目标对象; R_1 、 R_2 和 R_3 分别表示有向线 B 的起点、内部和终点相对于有向线 A 的方向关系。有向线 A 的起点、内部和终点分别记为 s 、 i 和 e , 平面被该有向线及其过其起点和终点的切线的垂线划分为若干区域, 分别称为左前(fl)、前(f)、右前(fr)、左(l)、右(r)、左后(bl)、后(b)、右后(br), 即 $R_i \in \{s, i, e, fl, f, fr, l, r, bl, b, br\}, 1 \leq i \leq 3$, 如图 5 所示。

两个有向线对象之间的空间关系可以根据目标对象的内部是否与参考对象相交分为内部不相交与内部相交 n 次($n \geq 1$)两大类。

1) 有向线 B 的内部与参考对象 A 不相交。当有向线 B 的内部与参考对象 A 不相交, 即 $R_2 \neq i$ 时, 可分别根据有向线 B 的起点与终点相对于 A 的关系, 得到 DLR 所对应的基本拓扑关系。

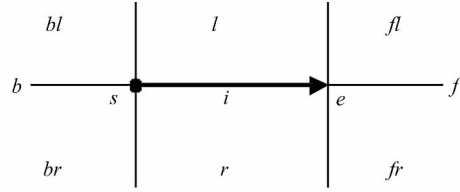


图 5 有向线空间关系模型参考框架

Fig. 5 Reference System of Directed Line Spatial Relation Model

① 当有向线 B 的起点及终点与有向线 A 均无交点时, $R_1, R_3 \notin \{s, e, i\}$, 对应的拓扑关系为相离(disjoint), 如图 1(a) 所示。

② 当有向线 B 的起点与 A 的起点重合时, $R_1 = s$, 对应的拓扑关系为分离(split), 如图 1(b) 所示。

③ 当有向线 B 的起点位于 A 的内部时, $R_1 = i$, 对应的拓扑关系为 B 为 A 的分支(divergedBy), 如图 1(c) 所示。

④ 当有向线 B 的起点与 A 的终点重合时, $R_1 = e$, 对应的拓扑关系为 A 在 B 后(follow), 如图 1(d) 所示。

⑤ 当有向线 B 的终点与 A 的起点重合时, $R_3 = s$, 对应的拓扑关系为 A 在 B 前(precede), 如图 1(e) 所示。

⑥ 当有向线 B 的终点位于 A 的内部时, $R_3 = i$, 对应的拓扑关系为融入(mergedBy), 如图 1(f) 所示。

⑦ 当有向线 B 的终点与 A 的终点重合时, $R_3 = e$, 对应的拓扑关系为相遇(meet), 如图 1(g) 所示。

2) 有向线 B 的内部与参考对象 A 相交。当有向线 B 的内部与参考对象 A 相交时, 即 $i \in R_2$ 时, B 的内部被交点划分为多个部分, 需分别考虑各部分相对于 A 的局部空间关系, 即:

$$R_2 = (Ar_0 B_0^\circ, Ar_1 B_1^\circ, \dots, Ar_n B_n^\circ) \quad (4)$$

式中, r_j 表示有向线 B 内部第 j 个与第 $j+1$ 个交点之间的部分相对于 A 的局部空间关系, $r_j \in \{l, i, r\}, 0 \leq j \leq n$ 。记 r_j 的反关系为 \check{r}_j , 当 $r_j = l$ 时, $\check{r}_j = r$ 。假若交分量为点, 其对应的局部拓扑关系可根据相对方向细分为内部相交(cross)(图 6(a))和内部相切(touch)(图 6(b)); 若交分量为线, 则对应的拓扑关系为内部部分覆盖(overlap)(图 6(c))。

DLR 模型对应的有向线之间 10 种 JEPD 的基本拓扑关系如表 1 所示, 复合拓扑关系可以通过基本拓扑关系组合而成。例如, 图 7(a) 中 DLR

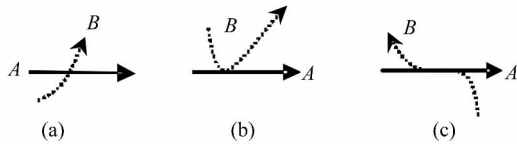


图 6 有向线内部相交

Fig. 6 Body-Body Intersections Between Directed Lines

$(A, B) = (i, l, e)$, 其对应的拓扑关系为 *divergedBy-meet*; 图 7(b) 中 $DLR(A, B) = (s, (r, l), i)$, 其对应的拓扑关系为 *split-cross-mergedBy*; 图 7(c) 中 $DLR(A, B) = (fr, (r, l, i, l), bl)$, 其对应的拓扑关系为 *cross-overlap*。

表 1 DLR 对应的有向线之间基本拓扑关系

Tab. 1 Basic Topological Relations Between Directed Lines Corresponding to DLR

内部是否相交	DLR	拓扑关系
	$R_1, R_3 \notin \{s, e, i\}$	disjoint
	$R_1 = s$	split
	$R_1 = i$	divergedBy
$R_2 \neq i$	$R_1 = e$	follow
	$R_3 = s$	precede
	$R_3 = i$	mergedBy
	$R_3 = e$	meet
	$r_j = i$	overlap
$i \in R_2$	$r_j = r_{j+1}$	touch
	$r_j = \check{r}_{j+1}$	cross

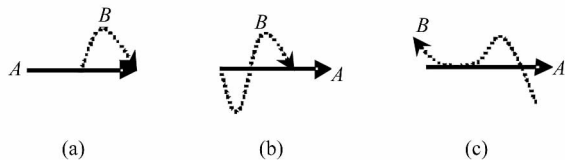


图 7 有向线空间关系描述实例

Fig. 7 Examples of Spatial Relations Between Directed Lines

3.2 与其他模型的对比分析

下面将有向线空间关系模型,即 DIA 模型、HBT 模型、DDLO 模型、DRA 模型与本文的 DLR 模型进行比较,如表 2 所示。

表 2 DLR 模型与其他有向线空间模型比较

Tab. 2 Comparison of Existing Models and DLR

模型	空间维数		空间关系		细节描述
	一维空间	二维空间	拓扑关系	方向关系	
DIA	✓		✓	✓	
HBT		✓	✓		
DDLO		✓	✓		✓
DRA		✓		✓	
DLR		✓	✓	✓	✓

1) 在空间关系描述能力上,DIA 模型只能描述一维空间中有向线对象之间的空间关系,不适

合对二维空间中有向线关系的表达。HBT 模型和 DDLO 模型均只描述了二维空间中有向线对象之间的拓扑关系,无法描述其方向关系。DRA 仅描述了二维空间中有向线对象之间的方向关系,未描述其拓扑关系。DLR 模型以二维空间中有向线之间的相对方向关系为基础,可从中解译出有向线之间的拓扑关系。

2) 在区分能力上,DDLO 模型需结合相应的图例才能区分有向线对象之间内部相交的细节拓扑关系,不易于自然语言理解,且不能区分具有不同方向的有向线对象之间的相离关系。DLR 模型以自然语言描述的方式,能有效地区分有向线对象之间的相离、内部相交等细节拓扑关系。如图 2 所示的三种不同的有向线之间的相离关系,应用 DLR 模型可分别得到以下三种不同的表示: $DLR(A, B) = (r, fr, fr)$, 如图 2(a) 所示; $DLR(A, B) = (f, fl, l)$, 如图 2(b) 所示; $DLR(A, B) = (br, b, bl)$, 如图 2(c) 所示。

HBT 模型将有向线内部相交、相切的关系统一用 *cross/touch* 表示,未考虑交分量为线的情况,而且不能描述有向线内部之间存在的多次相交的复杂拓扑关系。应用 DLR 模型可分别描述如图 3 所示的 5 种不同的有向线内部相交的关系,并根据方向关系得到对应的拓扑关系:

$DLR(A, B) = (br, (r, l), fl)$, 拓扑关系为 *cross*, 如图 3(a) 所示;

$DLR(A, B) = (fl, (l, r), br)$, 拓扑关系为 *cross*, 如图 3(b) 所示;

$DLR(A, B) = (br, (r, r), fr)$, 拓扑关系为 *touch*, 如图 3(c) 所示;

$DLR(A, B) = (bl, (l, i, l), fl)$, 拓扑关系为 *overlap*, 如图 3(d) 所示;

$DLR(A, B) = (bl, (l, r, l), fl)$, 拓扑关系为 *cross*, 如图 3(e) 所示。

4 应用实例

根据船舶和风暴的移动轨迹,利用 DLR 模型描述其空间关系可帮助海上船舶正确掌握与风暴的相对位置。若拓扑关系为相离,则可保持原航向继续航行;否则,应根据实际情况采取正确的避险方法。如图 8(a) 所示,某船在某日 t_1 时刻位于 a 点,航向 90° ,收到气象预报有一台风中心位于 b 点,正以每小时 6 海里的速度向 245° 方向移动。用 A 表示船舶的移动轨迹, B 表示台风的移动轨迹,则 t_1 时刻船舶和台风移动轨迹之间的空间关

系 $DLR(A, B) = (fl, fl, fl)$, 拓扑关系为相离。若继续保持该航向, 在 t_2 时刻船舶和台风的相对位置如图 8(b) 所示, $DLR(A, B) = (l, l, r)$, 拓扑关系为相交, 船舶将遭遇强风暴。因此, 需根据气象预报, 综合考虑风、浪等多种因素对航行的影响, 合理选择避险方法, 实现船舶避险。

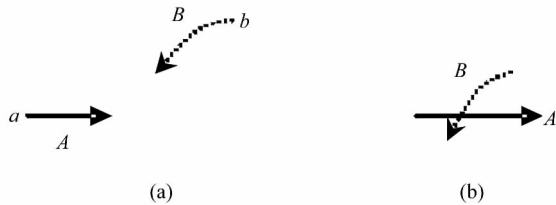


图 8 船舶与台风移动轨迹

Fig. 8 Trajectories of Ocean Vessel and Typhoon

5 结 语

针对有向线的特点, 综合考虑拓扑关系和方向关系, 建立描述有向线对象之间空间关系的 DLR 模型。与现有模型相比, DLR 模型不仅能描述二维空间中有向线对象之间的相对方向关系, 还能有效区分相离、内部相交、相切、部分覆盖等拓扑关系, 从而表达更复杂的拓扑关系。本文的后续研究工作将考虑结合度量关系, 提高 DLR 模型的表达能力, 如基于 DLR 模型分析移动对象的运动模式, 并对运动轨迹进行推理。

参 考 文 献

- [1] Egenhofer M, Franzosa R. Point-set Topological Spatial Relationships [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(2): 161-174
- [2] Egenhofer M, Sharma J, Mark D. A Critical Comparison of the 4-Intersection and 9-Intersection Models for Spatial Relations: Formal Analysis [J]. *AutoCarto*, 1993, 11: 1-11
- [3] 邓敏, 李志林, 李永礼, 等. GIS 线目标间拓扑关系描述的 4 交差模型 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(11): 945-974
- [4] Randell D A, Cui Z, Cohn A G. A Spatial Logic Based on Regions and Connection [C]. *The 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, San Francisco, 1992
- [5] Schneider M, Chen Tao, Viswanathan G, et al. Cardinal Directions Between Complex Regions [J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 2012, 37(2): 1-45
- [6] Frank A U. Qualitative Spatial Reasoning About Cardinal Directions [C]. *Austrian Conference on Artificial Intelligence*, Australia, 1991
- [7] Papadias D. Relation-based Representation of Spatial Knowledge [D]. Athens: National Technical University of Athens, 1994
- [8] Goyal R. Similarity Assessment for Cardinal Directions Between Extended Spatial Objects [D]. Orono: University of Maine, 2000
- [9] Zimmermann K, Freksa C. Qualitative Spatial Reasoning Using Orientation, Distance, and Path Knowledge [J]. *Applied Intelligence*, 1996, 6(1): 49-58
- [10] 邓敏, 黄雪萍, 刘慧敏, 等. 利用自然语言空间关系的空间查询方法研究 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(9): 1 089-1 093
- [11] Zheng Yu, Zhou Xiaofang. Computing with Spatial Trajectories [M]. NY: Springer-Verlag, 2011
- [12] Allen J. Maintaining Knowledge About Temporal Intervals [J]. *Communications of the ACM*, 1983, 26(11): 832-834
- [13] Renz J. A Spatial Odyssey of the Interval Algebra: Directed Intervals [C]. *The 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Seattle, 2001
- [14] Kurata Y, Egenhofer M. The Head-Body-Tail Intersections for Spatial Relations Between Directed Line Segments [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4 197: 269-286
- [15] 王生生, 王兆丹, 刘大有, 等. 有向线细节拓扑关系模型 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, 39(5): 1 292-1 296
- [16] Krieg-Brückner B, Hui Shi. Orientation Calculi and Route Graphs: Towards Semantic Representations for Route Descriptions [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4 197: 234-250
- [17] Moratz R, Lücke D, Mossakowski T. A Condensed Semantics for Qualitative Spatial Reasoning About Oriented Straight Line Segments [J]. *Artificial Intelligence*, 2011, 175(16/17): 2 099-2 127
- [18] Moratz R, Renz J, Wolter D. Qualitative Spatial Reasoning About Line Segments [C]. *The 14th European Conference on Artificial Intelligence*, Amsterdam, 2000

第一作者简介: 吴静, 讲师, 博士生。现从事地理信息建模、空间关系理论与方法的研究。
E-mail: wj8211@126.com

An Integrated Model to Represent Topological Relation and Directional Relation Between Directed Line Objects

WU Jing¹ DENG Min^{1,2} LIU Huimin¹

(1 Department of Geo-Informatics, Central South University, 932 Lushan South Road, Changsha 410083, China)

(2 Research Center of Foundation Geographic Information Engineering, Hunan Province, 693 Shaoshan Middle Road, Changsha 410083, China)

Abstract: Due to the increasing application demands, the issues on spatio-temporal characteristic of moving objects have attracted a wide range of attention in the fields of computer science and geographic information science. The spatial relations between two directed line objects, as one of the main topics about the trajectory of moving objects, contributes much to research on spatio-temporal data model. According to the characteristics of directed line objects in euclidean space, an integrated model of spatial relations between directed line objects, named DLR, is proposed, which divides the directed line object into head, body and tail. The model can not only describe the directional relations between directed line objects, but also distinguish the topological relations between them, such as disjoint, cross, touch and overlap. That is to say, the model proposed in this paper is able to enhance the identification capability of spatial relations between directed line objects. An example of typhoon evasion of ocean vessel is given to demonstrate the application of DLR.

Key words: directed line objects; topological relation; directional relation

About the first author: WU Jing, lecturer, Ph D candidate, specialized in geographic information modeling, theories and methods of spatial relationships.

E-mail: wj8211@126.com

(上接第 1352 页)

Discriminant Space Method for Scaling Land Cover Information

YOU Jiong¹ ZHANG Jingxiong²

(1 Chinese Academy of Agricultural Engineering, 41 Maizidian Street, Beijing 100125, China)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper explores a scaling method for land cover information based on discriminant space models. To obtain land cover classification according to discriminant space models at different scales, the scaling of discriminant vectors were realized, and then discriminant space models composed of these transformed discriminant vectors were found. Two classification methods including the maximum likelihood classifier and SVM method were used. The results achieved with the proposed method were compared with those of conventional scaling methods on the basis of majority theory and the rule of centric cell, thus validating the effectiveness and the availability of the proposed method. Experimental results show that the proposed method had better results and a smaller information loss than the conventional scaling methods.

Key words: land cover; scaling; discriminant space models; scale effects; information loss

About the first author: YOU Jiong, Ph D, specialized in agricultural remote sensing, uncertainty analysis, etc.

E-mail: rsjone@whu.edu.cn