



轨迹数据地理关联 建模与分析

向隆刚 龚健雅 吴 涛 张彩丽 著
邵晓天 王德浩 王星星 高 萌

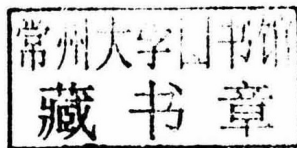
非外借



科学出版社

轨迹数据地理关联建模与分析

向隆刚 龚健雅 吴 涛 张彩丽 著
邵晓天 王德浩 王星星 高 萌



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者结合近5年(2014~2018年)在轨迹数据建模、组织与分析方面的研究成果所撰写的。全书共6章,针对现有轨迹挖掘研究在地理空间信息上下文关联方面的不足,系统阐述大规模轨迹数据的地理关联建模、管理与分析技术。第1章总结轨迹数据研究方面的国内外进展;第2章概述轨迹数据相关的管理分析技术;第3章讨论大规模轨迹数据的索引与组织问题;第4章介绍轨迹-要素时空关联模型及其关键技术;第5章分析移动对象相对于地理要素的拓扑移动过程;第6章研究地理关联轨迹的时空模式分析方法。

本书可作为高等院校测绘工程、地理信息系统、计算机等相关专业的本科生、研究生、高校教师及研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

轨迹数据地理关联建模与分析/向隆刚等著. —北京:科学出版社, 2019.9

ISBN 978-7-03-062090-3

I. ①轨…II. ①向… III. ①数据采集 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第179151号

责任编辑:杨光华/责任校对:刘畅

责任印制:彭超/封面设计:苏波

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5 (720×1000)

2019年9月第一版 印张: 12 3/4

2019年9月第一次印刷 字数: 257 000

定价: 128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着定位技术、通信技术与移动设备的不断发展与成熟，特别是全球定位系统接收设备在小型化与商业化方面的持续进步，获取移动对象的连续定位信息，即轨迹数据，不再是一件难事。目前，相关行业已经收集了海量的轨迹数据，并且其规模与日俱增。轨迹数据蕴含了丰富的信息与知识，可以应用到位置服务、交通管理、城市规划与动物保护等多个行业之中。为了从海量轨迹数据中提取隐藏的信息与知识，学者们在组织模型、查询方法、分析技术、挖掘算法与行业应用等多方面开展了大量工作，取得了丰硕的研究成果。

在轨迹数据组织模型方面，相关研究很多也很深入，但大多是扩展数据库系统中已有空间模块的点/线/面类型来表达与组织轨迹的点串数据，或利用轨迹 Stop/Move 概念模型来组织轨迹数据，很少就轨迹-地理空间要素间存在的复杂时空关联关系展开系统深入的探讨。在轨迹数据查询分析技术方面，虽然对近邻、范围等经典时空查询问题的研究较多，但针对轨迹-要素时空关联语义的查询分析工作较少。而在数据挖掘研究中，大多从任务驱动角度来集成地理空间数据，建立在底层的时空关联轨迹模型之上的挖掘研究并不多。总体来说，已有工作在轨迹-地理空间要素间复杂时空关联关系的语义建模和面向时空关联轨迹的分析挖掘两方面的研究还比较薄弱。

针对上述问题,作者结合近5年(2014~2018年)在轨迹数据地理关联建模与分析方面的研究心得与成果,尝试撰写一本专门介绍该方面研究进展的学术著作。在简要梳理国内外研究现状及轨迹数据管理分析理论的基础上,本书重点阐述我和研究团队在轨迹地理关联建模与分析方面的研究成果,主要包括大规模轨迹组织与管理、轨迹 Stop/Move 概念模型与停留检测算法研究、轨迹-要素拓扑移动过程建模、地理关联轨迹模式分析等。

本书研究主要受到 Spaccapietra 等提出的 Stop/Move 概念模型的启发,通过把丰富的地理空间上下文信息引入轨迹数据的组织、查询、分析与挖掘4个应用层面,旨在将轨迹从点串数据升华为语义对象,实现语义立现的查询、分析与挖掘,从而为建立关联于地理空间信息的轨迹应用分析系统奠定技术基础。轨迹数据的地理关联研究属于 GPS 轨迹数据的应用基础研究,目前还属于研究的开始阶段,希望更多科研人员加入进来,并希望本书的撰写能促进地理关联建模与分析研究的进一步深入与应用。

本书出版受到国家自然科学基金面上项目“大规模轨迹数据的地理空间关联解译及分析挖掘”(项目号:41471374)的资助,在此表示感谢!除相关研究人员外,本书的撰写还得到了我的硕士研究生(陶强强、葛慧玲、周文祥、刘小明)的直接帮助,在此表示感谢。感谢武汉大学、测绘遥感信息工程国家重点实验室,它们为课题的研究和本书的出版提供了便利条件。

轨迹数据的地理关联建模与分析研究涉及的范围较广,书稿难免存在疏漏之处,恳请读者批评指正。

向隆刚

2019年5月于武汉大学珞珈山

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	3
1.2 研究与应用进展	4
1.2.1 轨迹数据建模	4
1.2.2 轨迹数据管理	10
1.2.3 轨迹数据分析	13
1.3 本书的主要内容	15
参考文献	16
第 2 章 轨迹数据管理分析	25
2.1 轨迹数据的概念与特征	27
2.1.1 概念与定义	27
2.1.2 轨迹数据基本特征	28
2.2 轨迹数据建模	30
2.2.1 通用数据模型	30
2.2.2 语义数据模型	32
2.3 轨迹数据管理	35
2.3.1 移动对象数据库 SECONDO	36
2.3.2 ESRI GeoDatabase	42

2.3.3 实时 GIS 数据库 GeoDynoDB	43
2.4 轨迹数据分析	46
2.4.1 单体模式分析	47
2.4.2 群体模式分析	48
参考文献	52
第 3 章 大规模轨迹组织与索引	55
3.1 分布式轨迹组织	57
3.1.1 存储结构总体设计	57
3.1.2 库表模式与结构	61
3.2 轨迹索引及查询处理	65
3.2.1 轨迹数据的 Geohash 编码及其范围查询	65
3.2.2 轨迹数据的自适应索引框架 Geohash-trees	73
参考文献	80
第 4 章 地理关联轨迹模型及关键技术	83
4.1 时空关联 Stop/Move 模型	85
4.1.1 Stop/Move 轨迹模型	85
4.1.2 地理关联轨迹模型	88
4.2 轨迹停留检测技术	90
4.2.1 基于核密度的轨迹停留提取及可视化	92
4.2.2 面向序列聚类的轨迹停留提取	102
参考文献	112
第 5 章 轨迹-要素拓扑移动过程建模	115
5.1 关键点构建与提取	117
5.1.1 关键点定义	117
5.1.2 关键点计算	117
5.2 轨迹-有向线拓扑过程建模	120
5.2.1 轨迹-有向线语义拓扑关系及编码	121
5.2.2 轨迹-有向线拓扑移动过程模型	125
5.3 轨迹-面拓扑过程建模	128
5.3.1 轨迹-面语义拓扑关系及编码	128
5.3.2 轨迹-面拓扑移动过程模型	130
5.3.3 轨迹-多面拓扑移动过程建模	133

5.4 轨迹-要素拓扑移动过程建模	134
5.4.1 轨迹-要素拓扑表达结构	134
5.4.2 轨迹-多要素拓扑过程建模	135
参考文献	137
第 6 章 地理关联轨迹分析	139
6.1 地理关联轨迹的时空关系分析	141
6.1.1 轨迹时空关系分析	141
6.1.2 轨迹关联关系分析	147
6.2 轨迹-要素拓扑移动过程分析	152
6.2.1 轨迹-线拓扑移动过程分析	153
6.2.2 轨迹-面拓扑移动过程分析	160
6.3 轨迹-路网的时空关联分析	169
6.3.1 轨迹-路网时空关联建模	169
6.3.2 轨迹-路网关联结构及分析	182
参考文献	193
后记	195

第 1 章

绪 论

轨迹数据是一种重要的、新兴的时空数据。伴随无线传输技术、空间定位技术的快速发展,以及软硬件计算能力的提升,越来越多的研究学者把关注点投向反映移动对象轨迹的语义表达、数据组织管理、模式分析和行为挖掘等方面的研究。本章首先阐述轨迹数据地理关联建模与分析的研究背景及研究意义,然后从轨迹数据建模、轨迹数据组织管理和轨迹数据分析等方面介绍研究进展,总结现有研究方向的问题,提出本书的解决方案及策略,最后给出本书的内容组织结构。

1.1 概 述

众所周知,现实世界是动态变化的,存在大量的运动实体,如飞机、行驶的车辆与行人及变化的风暴、林火与飓风等,这些随着时间而演变的空间对象通常被称为移动对象。移动对象是空间与时间耦合框架下的统一体,大致可以分为两类:①随时间其位置不断发生变化的移动点对象;②随时间其形状/位置不断发生变化的移动面对象。随着移动定位技术和通信技术的不断融合,以及位置相关服务、物联网和智慧城市等应用的不断发展,移动对象的轨迹数据获取越来越简单,其数据量以指数级趋势增长。人们借助车载导航仪、便携式掌上电脑(personal digital assistant, PDA)、GPS手表等就能轻松地获取轨迹数据。特别是移动互联网时代的到来,基于位置服务(location based service, LBS)的蓬勃发展,来自手机地图导航、旅游路线分享、餐饮住宿热点搜索等的轨迹数据更是呈井喷式涌现。如何从海量轨迹数据中分析挖掘出感兴趣的、有价值的信息,已经成为当前地理信息系统(geographic information system, GIS)领域的一大热点。更多个人与机构开始越来越关注移动对象轨迹的记录与展示,对象行为的监测、模式分析与挖掘,在国防安全、城市智能交通监测与管理、路径导航与个人出行管理、动物迁徙与环境保护等众多领域得到应用与发展。一般而言,运动对象的几何形状可以是任意空间类型,并且是由从时间域到空间域的函数定义。为简单起见,但不失一般性,笔者将重点放在具有点几何的移动物体上(简言之,就是移动点)。

轨迹数据由包含空间位置与时间信息的点串构成,属于一类典型的时空数据。作为一种时间序列数据,轨迹在客观上记录了对象进行活动的位置信息和相应时间信息,不仅描述了移动对象的空间活动轨迹,同时蕴涵着移动对象自身特有的属性、状态和行为特征,还能在一定程度上反映对象活动与所处环境中各种要素之间的交互关系。例如,出租车轨迹数据,除了记载车辆在城市路网中的行驶路线,同时隐藏着特有的行为信息(比如加油、就餐、上下客等),使其区别于私家车,还能在很大程度上客观反映较大范围的城市路况;对于鸟类迁徙而言,一类重要的信息便是鸟类在飞行过程中面临的天气状况,以及鸟类停在哪里,为什么停留以及停留多长时间;而当分析行人轨迹时,普通用户更喜欢将轨迹视为以下语义编码的三元组序列:(home, -9am, -) → (road, 9am~10am, on-bus) → (office, 10am~5pm, work) → (road, 5pm~5:30pm, on-metro) → (market, 5:30pm~6pm, shopping) → (road, 6pm~6:20pm, on-foot) → (home, 6:20pm-, -)。遗憾的是,前期相关研究主要集中于原始轨迹数据,通常只是简单地将其表述为连续的时空点序列,侧重于表征对象的时空分布特征,没有附加任何语义信息,没有完整表达轨迹的时态信息

和时空关系,难以直接用于数据分析、知识提取等。

随着轨迹数据研究不断深入,特别是在 Spaccapietra 等(2008)提出 Stop/Move 概念模型后,人们开始从语义角度关注轨迹的移动过程及行为模式,更多地从移动对象的角度来分析轨迹隐含的行为语义,出现了大量基于 Stop/Move 概念模型的研究。但是,大多数工作主要围绕 Stop/Move 对象的组织模型与提取方法两方面而展开,在集成地理空间上下文信息,考虑空间拓扑不变量并开展查询分析方面的研究还比较少,在关联语义表达、空间集成度和查询能力等方面仍需进一步增强。因此,完善轨迹数据与地理空间要素之间的关联理论,设计面向时空关联关系的轨迹数据组织模型,实现基于纯结构化查询语言(structured query language, SQL)的针对轨迹数据的复杂时空模式查询,有助于进一步完善轨迹数据的建模理论,丰富轨迹数据的分析方法。为此,本书面向丰富的地理空间上下文信息,讨论轨迹数据的地理关联建模与分析工作,不仅可以显著提升轨迹模型的可理解性,而且能够开展更为明确、更具语义的查询、分析与挖掘任务,其结果也将更易于被用户所解译。

1.2 研究与应用进展

较之传统空间数据类型,轨迹数据更易于采集且携带丰富信息,已经发展成为一类重要的空间数据类型,吸引了来自数据库、测绘、地理与交通等多个领域的专家投身其中,在轨迹数据组织模型、轨迹数据管理方法、轨迹数据分析技术及其行业应用等多方面开展了卓有成效的研究。

1.2.1 轨迹数据建模

轨迹数据模型,作为时空数据模型(Longley, 1999)的一个分支,其研究历史并不算长。在 21 世纪初期,随着定位技术、网络传输技术以及应用需求的发展与驱动,国内外研究者和技术人员开始对轨迹数据的表达与建模表现出兴趣,开展了大量的研究和实践。目前,关于轨迹数据的模型研究主要集中于时空特征建模,包括时空扩展的轨迹数据模型、基于 Stop/Move 的语义轨迹数据模型,以及面向本体的轨迹数据模型。概括来说,这些轨迹模型多从定量特征角度来分析与表达轨迹,较少考虑轨迹移动过程中固有的拓扑不变量。

1. 时空特征建模

1) 时空扩展的轨迹数据模型

Gütting 及其团队在空间数据类型和时态数据类型的基础上,提出了时空数据

类型 (Güting et al., 2003; Benade et al., 2000), 已被学界普遍接受, 并广泛运用于各种时空模型中。相关学者从各自的研究和应用角度出发, 提出了各种各样的时空数据模型: ①基于实体关系(entity relationship, ER)模型的时空数据模型(Khatri et al., 2004; Tryfona et al., 2003); ②基于面向对象方法的时空数据模型(Larrivée et al., 2005; Bédard et al., 2004; Griffiths et al., 2004; Camossi et al., 2003; Bo et al., 2002; Price et al., 2002; Borges et al., 2001; Brodeur et al., 2000); ③基于约束逻辑的时空数据模型(Grumbach et al., 2015; Rigaux et al., 2003)。

Kanellakis 等在 20 世纪 90 年代率先提出并进一步深入研究了约束数据模型(Kuper et al., 2000; Kanellakis et al., 1995), 在描述二维几何图形的基础上增加了时间维, 从而可以表达三维时空(即二维空间与一维时间)中的几何变化。该模型以多项等式和多项不等式的布尔组合来表达二维几何图形, 可以在数据库中有效描述无限几何图形。这种表达固定图形的方法经过修改, 即扩展时间维之后, 很容易用来描述变化的图形。随后, Kuijpers 等(2000)针对物体在移动和几何形变过程中的拓扑变化, 提出了一种类似 SQL 的查询语言。

基于上述模型, 可以模拟轨迹几何形态随时间发生的变化, 但只是简单地把轨迹看作时间到空间状态的映射, 并不能进一步描述轨迹的内部结构。基于位置服务应用的普及对时空数据模型提出了新的需求: 既能追踪对象的位置移动(或变化)过程, 又能支持位置相关的查询操作。为此, 移动对象数据库(moving objects databases, MOD)研究领域的学者们一直在探索如何在计算机系统表达的轨迹结构中有效整合时间和空间数据, 进而支持高效检索。Wolfson(1998)及其研究团队基于移动点的当前运动, 在不久将来的预期位置描述方面开展了许多工作。Sistla 等(1997)描述了动态属性概念, 提出了针对当前和未来的移动对象时空(moving objects spatio-temporal, MOST)数据模型, 尝试用运动向量替代移动对象采样位置, 以此来避免更新负载, 同时以关于时间的线性函数来描述移动对象的空间位置(该函数由对象的空间位置和速度向量共同决定), 在此基础上提出了未来时态逻辑(future temporal logic, FTL)查询语言及查询处理; Wolfson 等(1999)进一步讨论了位置更新代价和不精确性之间的平衡问题。上述模型已嵌入该团队所开发的 DOMINO 数据库原型系统中, 并通过在一般数据库(Sybase 和 Microsoft Office Access)中扩展已有查询语法, 可以根据原始轨迹数据来计算和反馈实时位置。Güting 团队(Lema et al., 2003; Benade et al., 2000; Forlizzi et al., 2000; Erwig et al., 1999)将移动对象视作三维(二维空间附加时间维)或者更多维(例如属性维)的个体, 以抽象数据类型来对结构和行为进行建模, 并深入探讨了移动点轨迹在时空三维中表现出的两种形态——曲线和折线, 并分别为其赋予术语: 抽象模型和离散模型。在此基础上, Erwig 等(1999)设计了相应的查询语言, Forlizzi

等(2000)提出上述抽象数据类型的离散表达,即将一个对象的移动过程分解为多个时空片段。该移动对象数据模型及其查询语言已被整合到数据库管理系统(data base management system, DBMS)环境,其原型作为一个代数模块被置于SECONDO(Almeida et al., 2006; Dieker et al., 2000)的扩展环境中。

轨迹建模同样涉及不确定性问题,并有可能受到路网约束,这方面也有不少研究工作:Trajcevski等(2002)介绍了移动点位置的固有不确定性问题,并在2004年对该问题进行了扩展;Mokhtar等(2004)以及Pfoser等(1999)主要讨论了GPS测量的采样频率和已知轨迹精确性之间的关系;Cheng等(2004)讨论了不确定性对象的位置概率查询技术;Pelekis等(2007)提出了能支持各种不同插值方法的可扩展机制,不仅适用于历史轨迹数据的查询,还可以处理当前动态轨迹数据;Hajari等(2014)基于Open Geospatial Consortium,扩展出面向路网环境的移动对象模型,并设计了相应的查询语言。

2) 基于 Stop/Move 概念模型的语义轨迹数据模型

上述模型研究多是从刻画移动对象的角度出发,轨迹只是该环节的副产品,因而很少涉及轨迹的语义描述。如果把一个移动对象仅仅描述为记录其整个生命周期中所有空间位置的演变过程,将会丢失移动路径各个部分的隐藏语义。因此,一些学者逐渐把轨迹建模的研究方向从单纯描述空间位置变化转向关联更多语义信息,以增强轨迹的表达能力,从而达到表达更为丰富的对象活动信息和支持更为复杂的轨迹查询操作。

Spaccapietra等(2008)通过研究候鸟迁徙轨迹获得灵感,利用轨迹划分技术,提出利用 Stop/Move 语义模型来重新诠释移动对象的轨迹。该模型将轨迹分解成多个 Stop/Move 对象单元,从而更易于分析轨迹的行为模式,是轨迹建模领域中最具影响力的工作之一。在 Spaccapietra 等提出 Stop/Move 模型之后,学者们开始更多地从语义角度关注轨迹的移动过程及行为模式,并基于 Stop/Move 模型开展了大量研究工作。

Moreno等(2010)在 Stop/Move 模型的基础上,根据上下文信息扩展 Stop 概念,提出一个通用的算法框架,即根据移动对象的行为来为轨迹附加语义信息,并利用轨迹的速度、方向和领域知识等来推测移动对象的行为,帮助理解 Stop 内部的具体活动,便于后续对轨迹数据的挖掘分析;Celli等(2010)提出了更为复杂的关联模型,针对不同类型的兴趣点,设定相关联的“停留”行为的时间标准;Bogorny等(2010)扩展 Spaccapietra 等提出的概念模型,从语义的角度对移动物体的轨迹进行建模,提供了语义轨迹顺序模式、轨迹关联规则和轨迹频繁模式,并实现了语义轨迹数据的挖掘查询语言(semantic trajectory data mining query

language, ST-DMQL)。

Andrienko 等 (2011) 认为运动是空间事件的集合, 提出了基于事件的轨迹概念模型, 认为运动与空间 S 、时间 T 、对象 O 这 3 个基本集合有关, 并且每个子集的要素有自己的特性或属性 A 。Andrienko 等 (2011) 将移动对象随时间空间位置发生变化称为轨迹, 用映射 $T \rightarrow S$ 表示, 由一系列基本空间事件 (t, s) 组成; 并将移动对象动态属性发生变化映射为 $T \rightarrow A$, 由一系列基本时间事件 (t, a) 组成; 最后连接 $T \rightarrow S$ 和 $T \rightarrow A$ 形成 $T \rightarrow S \times A$, 组成三元组 (t, s, a) 。从而将移动对象 O 的移动事件表示为 (o, t, s, a) [可以通过将 (t, s, a) 变换为 $(t, s(t), a(t))$ 来强调 s 和 a 对 t 的依赖性]。Yan 等 (2011) 基于 Stop/Move 模型, 提出了一个用于在不同抽象层次上注释轨迹的多层框架 (semantic middleware for trajectories, SeMiTri), 首先利用潜在运动信息 (例如时空数据) 将轨迹结构转化为 Stop 和 Move 事件, 然后利用地理空间对象 (区域, 线和点) 来注释 Stop 和 Move。通过将轨迹数据抽象为语义表示的轨迹段, 使得人们能够更好地理解语义行为, 同时能够进行上下文相关的信息挖掘 (例如: 语义相似性, 语义模式挖掘, 移动性分析/统计), 从而满足高层应用的需求。

Parent 等 (2013) 综述了语义轨迹建模和分析方面的工作, 认为轨迹语义建模缺少一个集成的概念模式。Bogorny 等 (2014) 认为语义轨迹的概念数据模型应该更灵活, 以使用户可以向轨迹添加任何类型的语义信息, 为此, 提出了另一种新型的语义轨迹模型, 称为语义轨迹的概念数据模型 (conceptual model of semantic trajectories, CONSTAnT)。该模型侧重于描述移动对象、生成轨迹的设备、语义轨迹、语义子轨迹、语义点、环境、地点和事件, 可用于计算轨迹行为、形成子轨迹、探测轨迹目标等。Zheng (2015) 基于变化点分段和决策树模型, 将个人出行轨迹数据与“驾车”“步行”“公交”“自行车”4 种交通模式进行关联建模。

3) 面向本体的轨迹数据模型

Stop/Move 模型同时激发了研究人员将本体思想注入轨迹语义建模研究之中。Baglioni 等 (2008) 提出了一种用于语义建模和轨迹推理的本体论方法, 强调了将原始轨迹转换为语义轨迹的必要性, 并制定了 Web 本体语言描述逻辑 (web ontology language-description logics, OWL-DL) 公理, 用于根据停靠点的持续时间和位置来识别休闲游戏活动中的恶意行为。Baglioni 等 (2009) 遵循相同的策略, 探测旅游活动中的频繁模式。Renso 等 (2013) 对上述轨迹本体模型进行了扩展, 用于表示人类行为的实体, 包括 Syntactic Trajectory、Stop、Move、Time、Place 和 Pattern 等。Orellana 等 (2010) 基于运动模式和背景之间的相互作用, 对国家公园内的行人运动进行建模, 不仅建立了交互本体论, 还对运动模式进行分类及编

码,并通过预先定义的公理进行子类推理,从而支持运动模式的识别。

Hage (2012) 认为轨迹可以建模为一系列事件,通过使用通用的简单事件模型 (simple event model, SEM) 和本体论来表示船舶轨迹。Nogueira 等 (2015) 基于本体理论,提出了语义轨迹事件 (semantic trajectory episodes, STEP) 模型,旨在表达任意数量的感兴趣特征及其事件片段,以表达多个领域的各种时空信息。考虑 STEP 仍然没有涵盖轨迹建模的一些期望要求,例如支持不同粒度级别的片段表示,Nogueira 等 (2018) 提出了一个基于片段注释的语义轨迹框架 (a framework for annotating semantic trajectories based on episodes, FrameSTEP)。该框架可以在轨迹分析中引入专家系统,能够推断从大型轨迹数据和链接数据集中收集的知识,以创建多种智能服务。Cruz 等 (2018) 提出了动态环境中的语义轨迹 (semantic trajectories in dynamic environments, STriDE) 模型,用于刻画动态构建环境中的移动和变化对象。该数据模型基于本体论和逻辑描述来构建语义轨迹的逻辑约束,通过对连续模型进行扩展,将移动对象定义为要素类,并以时间片段来描绘动态实体。

2. 拓扑过程建模

轨迹是对象在地理空间中移动过程的记录,其数据表现为携带对象位置与时间信息的离散时空点 $P(x, y, t)$ 序列 (例如 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow \dots$)。从空间特征出发,轨迹在地理空间中的投影是有向线,称为轨迹线。考虑拓扑学在描绘轨迹移动相关的地理事件特性的认知中,扮演着相当重要的角色,因此,线/点、线/线、线/面空间拓扑关系,以及移动对象间时空拓扑关系方面的研究直接与本书研究密切相关。

早在 20 世纪 80 年代初提出空间关系理论后,美国国家地理信息中心于 1987 年将“空间关系的基本理论”(a general theory of spatial relationships) 列为未来十年优先研究的 5 个专题之一,线/点、线/线、线/面空间拓扑关系方面开始出现大量研究。在线/线拓扑关系方面,Clementini 等 (1998) 建立了线目标间拓扑关系的拓扑不变量;Kurata 等 (2006) 提出了头-体-尾 (head-body-tail, HBT) 模型,将有向线段分为 head、body 和 tail 三部分,以九交矩阵的形式区分出 68 种不同的拓扑关系;王生生等 (2009) 提出了细节拓扑关系模型 (detail of directed line object, DDLO), 通过结合相应的图例,可以精确描述有向线对象多次相交的细节;吴静等 (2013) 基于 Double-Cross 模型,将一条有向线作为参考对象对空间进行划分,建立了三元组方向线关系 (directed line relation, DLR) 模型,综合考虑拓扑关系和方向关系,对有向线间空间关系进行形式化描述,能够有效区分相离、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。在线/面拓扑关系方面,Kurata (2009) 基于点集拓扑的九交模型,区分出 19 种线/面拓扑关系;Kurata

(2010)提出改进的九交模型,能够描述 26 种有向线与单区域间的拓扑关系;Zhilin 等(2002)基于 Voronoi 图提出的空间代数方法,可以区分出包括 6 种基本线/面关系的拓扑关系;邓敏等(2008)提出了线面目标间拓扑关系的层次表达方法,通过结合相应的图例,可以精确描述复合的线/面拓扑关系;郭庆胜等(2005)提出的组合描述方法,可以得到 97 种线/面拓扑关系;周晓光等(2015, 2006)基于目标整体交-差和欧拉数,提出的拓扑关系模型覆盖了 19 种线面拓扑关系;Sester 等(2012)通过引入节点度,进一步研究了线/面拓扑关系细分方法,总结出 21 种有意义的线/面单元交线类型。

近 20 年来,随着全球定位系统、无线通信技术与移动计算的快速发展,动物习性、智能交通、行为识别、移动位置服务、生态环境监测和人工智能等领域对移动对象分析的需求越来越大,移动对象间时空关系方面的研究也如雨后春笋般蓬勃发展。Kurata(2007)用有向线表达移动点的轨迹,基于九交矩阵区分了 26 种有向线和面目标的拓扑关系;Van 等(2004)扩展 Double-Cross 和区域连接演算(region connection calculus 8, RCC-8)模型,在拓扑关系为相离的情况下,基于距离关系、速度、加速度等参数,提出一系列定性轨迹演算模型(qualitative trajectory calculus, QTC);Chen 等(2011)扩展投影模型,利用相对运动将两个移动对象间方向关系计算映射为求一个移动对象与一个静止对象之间的方向关系,从而对移动点的时空方向关系进行建模及形式化描述;Kurata 等(2008)扩展 Double-Cross 模型,将 Landmark 表示为空间点目标和面目标,对移动对象轨迹进行了描述,对路径引导中移动对象的运动进行了解译。Na 等(2006)将移动对象的运动轨迹表达为线,得到空间线与面之间的 19 种拓扑关系,并用来描述足球的运动模式;高勇等(2007)将路径信息服务视为城市交通指挥系统、导航系统等信息系统中最为关键的内容,对移动点-参考地物空间拓扑关系进行建模,将其表示为“变化前观测时刻”、“突变时刻”和“变化后观测时刻”的三元组: $R=(R_{is}, R_{im}, R_{ic})$ 。

回归到轨迹本质,轨迹并不是简单的有向线,而是对象在空间中的移动过程记录,包含了对象在整个移动过程中的时间信息、位置信息以及特定的移动模式或行为。合理的组织和描述这些重要信息对于后续更进一步的移动对象研究至关重要,比如游客轨迹中的停留行为对于行程规划的研究是不可或缺的信息。现有轨迹模型多从定量特征的角度来分析与表达轨迹,没有考虑轨迹移动过程中所固有的拓扑不变量,更缺乏轨迹与地理要素之间的复杂时空关系的一般性语义描述。另一方面,概念轨迹模型应该涵盖轨迹整体及其构件特征,包括属性、语义约束、拓扑约束以及与应用程序对象的链接(Nogueira et al., 2018)。在时空层面上,轨迹记录了移动对象从初始位置到最终位置之间的各个时刻所处的位置。但从语义层面来看,轨迹在其移动过程中所表现出的某些信息和特征,与对象在轨迹上起始两个