

网络空间移动对象模型的应用与发展

张恒才, 陆 锋, 陈 洁

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:海量移动对象轨迹数据的涌现促使移动对象数据库成为一个新兴的研究领域。网络空间是人与交通工具移动的主要空间范围,也是移动对象数据库领域最重要的研究空间。网络空间下的移动对象建模是交通科学、社会与城市计算的基础性关键技术。由于受到所依附的地理空间的限制,网络环境下的移动对象数据表达与自由空间相比具有很大的特殊性,面临新的挑战。本文分析了网络空间移动对象建模的基本需求,对20年来,业界提出的各种网络空间移动对象数据模型进行了系统回顾和分类,深入分析了各种网络空间移动对象数据模型的特征、优点与局限性,提出了现阶段网络空间移动对象数据建模需要关注的关键问题,并对未来研究方向进行了展望。

关键词:移动对象;空间数据库;网络空间;数据模型;轨迹

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00328

1 引言

随着卫星定位和蜂窝定位技术、移动通信技术、计算机与传感器网络技术的不断发展,海量移动对象(机动车、手机终端、WiFi和RFID终端等)轨迹数据的实时获取已经成为现实^[1]。移动对象轨迹数据作为一种典型的时空数据,具有数据量大、位置更新频繁、信息蕴含丰富等特点,为基于位置的服务(LBS)、交通管理、城市规划、社会计算等提供了重要的数据源^[2-3],移动对象轨迹数据也成为大数据(Big Data)时代的典型代表。移动对象数据库(Moving Objects Database, MOD)迅速成为一个新兴的研究领域。MOD旨在管理移动实体,例如,点对象(人、车辆、动物等)、场对象(冰川、台风、气压、海洋涡旋等),并能够支持移动对象的复杂查询。与传统的数据管理技术相比,MOD更加关注移动对象位置的连续变化与属性的动态更新^[4]。

近20年来,国内外学者在MOD领域开展了大量研究,一些权威学术期刊(如ACM TODS、VLDB Journal、IEEE TKDE、DKE、GeoInformatica、IJGIS等)和国际著名学术会议(如ACM SIGMOD、VLDB、ICDE、SSTD、DEXA、DASFAA、MDM、ED-

BT等)也都将MOD作为重要的主题内容。一些MOD管理系统原型,如Secondo、Hermes、DOMINO、PLACE、Dedale、NILE、SpADE等也相继出现。

移动对象的存在空间可分为自由空间^[4]、障碍物空间^[5]、网络空间^[6]及室内空间^[7]。其中,网络空间是业界最为关注的研究热点,也是人与交通工具移动的主要空间范围。网络空间移动对象管理技术具有重要的应用价值。例如,在城市计算(Urban Computing)领域,高效的网络空间移动对象管理技术,才能支持交通模式识别^[8]、频繁模式挖掘^[9]、个性化朋友与地点推荐^[10-11]、热点路径推荐^[12],城市功能分区^[13],路网分层及信息融合^[14-15]等。在计算交通领域(Computational Transportation),同样离不开网络空间移动对象管理技术的支持,以有效开展交通状态探测、交通控制与诱导、交通规划、交通预测等^[16-18]。

移动对象管理技术包括数据模型、索引、查询、预测、不确定性、位置更新、隐私保护等7个研究方向,数据模型是其核心。网络空间移动对象模型是网络空间下移动对象实时位置、轨迹及其关系的表达方法,是网络空间下移动对象查询、预测与分析的基础。由于网络空间下移动对象位移计算的特

收稿日期:2013-01-06;修回日期:2013-02-21.

基金项目:国家“863”项目(2012AA12A211、2013AA120305);国家自然科学基金项目(41271408、41101149、41001232)。

作者简介:张恒才(1985-),男,博士生,主要研究方向为移动对象数据库与时空数据挖掘,互联网空间信息搜索。

E-mail: zhanghc@lreis.ac.cn

殊性^[19],使得自由空间下的移动对象模型,如MOST模型^[4,20]、历史轨迹抽象数据类型模型^[21]、移动对象离散数据模型^[22]、离散时空轨迹DSTTMOD模型^[23]等,并不适合网络空间移动对象模型的构建。Jandt等利用Secondo与基准测试数据集BerlinMOD测试了自由空间与路网空间移动对象模型的效率,实验结果表明,采用网络空间下的移动对象模型可以节省40%的存储空间,并且提高50%的查询效率^[24]。因此,网络空间移动对象模型的研究非常必要。本文分析了网络空间移动对象建模的基本需求,对业界提出的各种网络空间移动对象模型进行了分类,探讨了各种模型的特征和优缺点,提出了现阶段网络空间下移动对象数据建模的关键问题与研究方向。

2 网络空间移动对象模型特征

高效的网络空间移动对象模型应满足时间建模、空间建模、时空动态语义信息建模及时空查询等4个方面的基本需求。

(1)时间建模方面:一般分为离散和连续时间建模两种^[25]。网络空间移动对象模型主要侧重于移动对象的连续变化过程,因此,必须支持连续时间建模。同时,移动对象轨迹可以分为历史轨迹,当前轨迹及未来轨迹,网络空间移动对象模型应该能够支持全时态移动对象轨迹的表达。此外,网络空间移动对象模型也应当支持针对时间的相关操作集合,如inside, meet等^[26]。

(2)空间建模方面:空间网络数据的管理是地理信息系统领域与空间数据库领域的核心研究内容,经过多年的发展,已有很多成熟的研究成果^[27-29]。然而,网络空间下的移动对象建模,对所依附的空间网络表达的需求有所不同。因为不同的移动对象在同一个空间网络中可能具有不同的位移行为,如行人、公交车、出租车等具有各自的网络出行行为,传统的空间数据管理方法是将空间网络建模为分散的简单空间对象,非空间属性信息通过其他属性信息表进行关联存储,没有显式地表达移动目标位移过程所依附的网络空间结构,也没有顾及到移动对象的建模。网络空间下移动对象模型中不仅需要显式地表达空间网络,而且还要能够表达空间网络的复杂性与动态性。另一个需要关注的是空间网络中移动对象的位置表达方法, GIS-T领域的

线性参考^[30-31]是一种比较有效的移动对象位置表达方式,与传统的坐标表达相比,线性参考位置表达可以减少存储空间,而且能够提高索引效率。

(3)时空动态语义信息建模方面:网络空间移动对象模型不仅要维护移动对象的位置及轨迹,还需要提供对非空间动态属性信息的支持。主要包含两类非空间属性信息,一类是移动对象在运动过程中随时间改变的属性值,如速度、加速度、环境信息等;另一类是通过数据挖掘等手段获取的移动对象轨迹语义信息,如活动信息^[32]、出行行为模式^[33]、轨迹关键点信息^[34]等。对这些复杂的时空动态语义信息进行融合组织,也是网络空间移动对象模型急需解决的问题。

(4)时空查询方面:移动对象查询是MOD的必备功能,由于移动对象具有时间与空间两个维度,移动对象的查询类型也变得异常复杂,尤其是在网络空间下的移动对象时空查询,还需要处理相关空间网络的查询,例如,“查询上周六12点编号为A的出租车所在的道路名称?”“查询昨天17-18点车辆密度最大的路段?”等。此类查询在传统关系数据库或者空间数据库中都不易实现。在MOD的相关研究中,人们已经提出多种类型的查询实现方法,如范围查询^[35-36]、邻近查询^[37-39]、Skyline查询^[40]及聚集查询^[41]等,众多的复杂查询的实现需要灵活多样的时间谓词、空间谓词及时空谓词组成。网络空间移动对象模型的设计与查询谓词的实现密切相关。此外,为满足移动对象的查询功能,查询语言的设计也是必须的,在自由空间下,许多研究学者提出了有效的时空查询语言,如FTL(Future Temporal Logic)语言^[42],但是针对网络空间下的移动对象时空查询语言还亟待研究。

3 基于路段的网络空间移动对象模型

早期的网络空间移动对象建模思想较为简单,将移动对象依附的空间网络表达为图 $G=(V,E)$,其中,V为路段与路段相交产生的节点,即交叉口,E为路段,即两个道路交叉口界定的道路片段。路段具有权重,表示路段长度或者通行时间。移动对象的位置表示为平面坐标或者路段上的线性参考值。移动对象的轨迹表示为空间上的几何折线。如图1所示。该路网片段由9个路段和3个节点组成,包括3条道路。轨迹序列片段T为由4个轨迹

停留点组成的折线。这种建模方式在早期非常普遍^[43-47]。2001年Vazirgiannis等^[48]首次给出了基于路段的网络空间移动对象模型的构建方式,并利用DDL SQL提出了该模型在关系数据库中的实现过程。

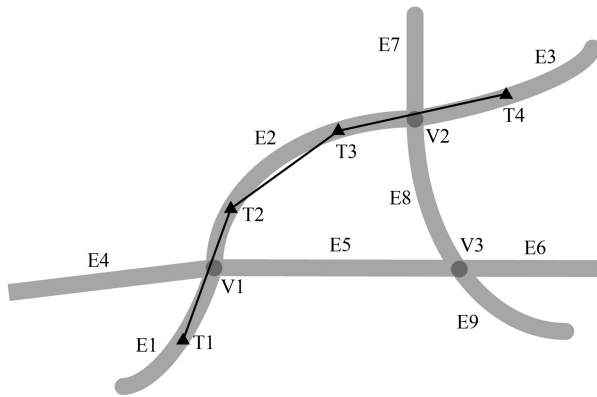


图1 基于路段的网络空间移动对象表达

Fig.1 Road segment based moving object representation in network space

基于路段的网络空间移动对象模型的优势在于移动对象建模较容易,便于在关系数据库中实现,缺点是模型过于简单,很难准确描绘真实的路网环境(如复杂立交桥、车行道、转向限制、道路状况、事故等)^[43]。为了提高路段的移动对象模型对复杂真实环境的表达能力,Brinkhoff等^[49]在路网图结构的基础上,定义路段上移动对象的最大速度,以及每条路段的最大容量,使其能够模拟真实环境下移动对象的位移行为。Ding等^[50]通过在路段与节点上分别关联一个动态属性,利用该属性来表示类似于交通事件等信息的变化,提出了一种随时间变化的交通网络SBDTM(State-Based Dynamic Transportation Network)模型,接着,又在此基础上提出了MODTN(Moving Objects on Dynamic Transportation Networks)模型,实现了对移动对象的建模^[51]。文献[52]研究了路段的网络空间移动对象模型下移动对象的索引问题,并提出了一种FNR树(Fixed Network R-Tree)索引结构。该索引是一个两层结构,上层采用一个2D R树,来对空间网络路段进行索引,下层是一个1D R树来对移动对象进行索引。但是由于该模型将路段作为建模单位,会造成上层R树的叶子节点过多^[53]。在路段的网络空间移动对象模型基础上,许多相关查询问题也得到深入研究^[54-57]。Papadias等^[58]提出了一个有效的查询框架,利用Incremental Euclidean Restriction(IER)与

Incremental Network Expansion(INE)进行依次搜索,实现移动对象数据库领域最常见的邻近查询、范围查询等,并且采用了磁盘的3种数据结构实现该模型的存储。文献[35]采用了基于磁盘的R树来实现对路网的存储,基于内存的格网索引实现对移动对象位置的索引,以支持路段的网络空间移动对象的查询。

随着网络空间移动对象相关应用的不断增多,路段的网络空间移动对象模型越来越难以满足对移动对象位置及轨迹建模的需求,故改进模型应运而生。Speicys等^[59-60]分别采用二维网络模型与图结构网络模型完成移动对象建模过程,并给出了路网的二维网络模型到图表达模型的转换算法。二维网络模型的优势在于能够捕获交通路网的关键信息,尤其是能够保持车道信息,处理转向限制,实现与POI的集成建模。图结构网络模型的优势在于能够维持路网的拓扑结构。在二维网络模型下,移动对象的位置 $dp=(prop, point, seg, acccode)$,其中,prop为属性列表,point为坐标,seg为路段的编号,acccode为该位置在路段方向上是否可访问;查询点位置表示为 $qp=(point, seg, direction)$,其中,point为坐标,seg为路段的编号,direction为移动对象的运行方向。在图结构网络模型下,移动对象位置表示为 $dp=(edge, pos_w, pos_l)$,其中,edge为移动对象所在的边, pos_w 与 pos_l 分别表示该移动对象相对于边的起点的位置与权重;查询点位置表示为 $qp=(edge, pos_w, pos_l, speed_w, time)$,其中, $speed_w$ 表示移动查询点运行速度。该改进模型可支持位置服务中当前移动对象的查询,但是并不支持完整轨迹建模,而且也没有给出相关的查询语言的定义。文献[61]也采用类似的思想实现了移动对象的临近查询算法。

另一个较重要的改进模型是Chen等提出的GCA(Graph Cellular Automata)模型。该模型将空间网络的一条路段离散化为一系列的单元,网络上所有的移动对象在某一个时刻都可以对应于一个单元。在该模型中将移动对象的轨迹分为路段轨迹与全局轨迹,路段轨迹表示移动对象在特定路段上的轨迹,可以用一个分段的线性函数表示 $f: T \rightarrow N, \langle \langle t_1, d_1 \rangle, \langle t_2, d_2 \rangle, \dots, \langle t_n, d_n \rangle \rangle$,移动对象的全局轨迹可以表示为路段的序列 $f: T \rightarrow (E, N), \langle \langle t_1, e_1, d_1 \rangle, \langle t_2, e_2, d_2 \rangle, \dots, \langle t_n, e_n, d_n \rangle \rangle$ 。该改进模型的创新之处在于将道路建模为元胞自动机,道路上的移动对

象作为元胞单元,通过人工定义元胞单元之间的运行规则,可以顾及相邻移动对象在运动过程中的相互影响,模拟移动对象在空间网络上的运动,从而实现动态复杂交通系统建模^[62],由于该模型利用了网络上移动对象的运动规律,可支持对移动对象轨迹的预测。

4 基于道路的网络空间移动对象模型

基于道路的网络空间移动对象模型类似于交通信息系统中基于特征的非平面路网模型^[63],即移动对象所依附的路网中的基本建模单元为道路整体而不是道路路段。空间网络建模为路网 $G=(Road, Junction)$, 其中, $Road$ 为道路集合, $Junction$ 为交叉口集合。Güting 等(2006)实现了一个道路的网络空间移动对象模型,并给出了相关查询语言的实现^[6]。该方法首先定义空间网络类型 $D_{network}$, 道路定义为 $Road=(roadid, length, geom, type, start)$, 其中, $roadid$ 为道路的编号, $length$ 为道路长度, $geom$ 为道路几何特征, $type$ 为道路类型, $start$ 用于标识道路位置计算的起点;交叉口定义为 $Junction=(roadid1, roadid2, conncode)$, 其中, $conncode$ 为交叉口的转向矩阵,可以实现对转向的建模;接着给出了移动对象位置数据类型 $D_{gpoint}=(roadid, pos, side)$, $roadid$ 为道路编号, pos 为移动对象位置的线性参考表达, $side$ 为道路方向;最后给出了移动区域数据类型 D_{gline} , 即移动对象在道路上的分布区域。在空间网络模型及位置表达的基础上,通过时态数据类型 $moving$, 利用离散的时间间隔分片实现了网络移动对象连续轨迹的形式化表达,可以支持如“2012年12月31日10点移动对象A所在的路段?”等查询。

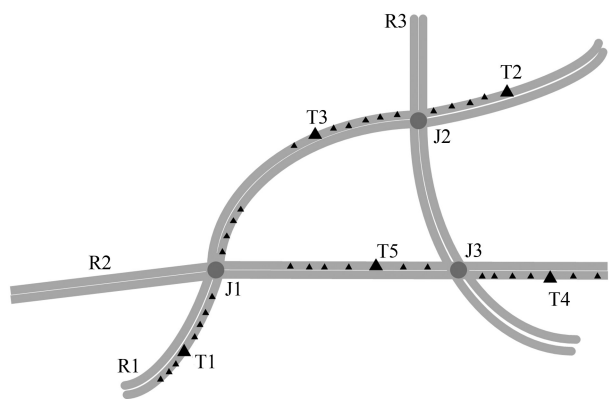


图2 基于道路的网络空间移动对象表达

Fig.2 Road based moving object representation in network space

图2为该模型的一个简单实例,包括3个交叉口、3条道路、5个移动点对象位置,以及4个移动区域。

基于道路的网络空间移动对象模型优势在于,一方面与真实环境中的道路实体对应,符合对移动对象的描述习惯,例如“大屯路由很多路段组成,我们描述移动对象运行于大屯路的100m处,而不是说大屯路的某个特定的路段”;另一方面基于道路的移动对象位置表达更加方便,位置更新代价也更小,利于移动对象连续变化情况下的表达。在该模型基础之上,Almeida等^[53]研究了网络空间移动对象索引问题,提出了一种MON-Tree结构,该索引分别采用路段与道路的网络空间移动对象模型,对比了两种模型下索引结构的效率。实验结果表明,道路模型效率更高。Xu等^[64-65]进一步扩充该模型,添加了对室内环境及非受限空间的支持,构建了一个更加通用的移动对象模型。Qi与Schneider^[66]提出了一种类似的网络空间移动对象模型MONET (Moving Object In NETwork),该模型采用了两层设计结构,底层为扩充Route概念后的空间网络模型,并定义了抽象数据类型 $network$ 来表达空间网络, $npoint$ 表示位置,与Guting等提出的 $gpoint$ 不同的是, $npoint$ 采用二维坐标来表达网络中的位置,也可以用来表达位于网络外的一个POI信息。该模型的上层是利用抽象数据类型 $mpoint$ 及 $mregion$ 实现的移动对象轨迹表达。此外,该模型定义了查询语言 MONET QL (MONET Query Language), 提供了一个相对高抽象层次的操作符集合。

基于道路的网络空间移动对象模型的缺点在于难以表达真实环境下不同移动对象的运行规则,例如,在同一个路网中,行人与机动车可能具有不同的移动规则;另外,该模型也不能有效区分两条道路之间的重合路段,尤其是在统计路网流量信息时,不利于实时道路交通参数的提取。鉴此,Ding等^[67]提出了一种改进的道路-行驶路段混合路网模型NMOD-TFSA,以实现交通流参数统计分析。

5 基于分区的网络空间移动对象模型

基于分区的网络空间移动对象模型将空间网络划分成不同的区域,由移动对象轨迹表达为网络区域序列,便于构建移动对象索引。2007年Kim等^[68]提出了一种格网轨迹建模方法,将路网进行格网划分,将移动对象轨迹坐标序列转化为格网单元轨

迹,如图3所示,移动对象的运行轨迹 O_1 可以表示为格网单元序列 $00 \rightarrow 01 \rightarrow 02 \rightarrow 3 \rightarrow 20 \rightarrow 21 \rightarrow 22$ 。该方法的创新性在于可以利用历史轨迹数据,统计每个格网单元内的概率矩阵,实现对移动对象的预测。

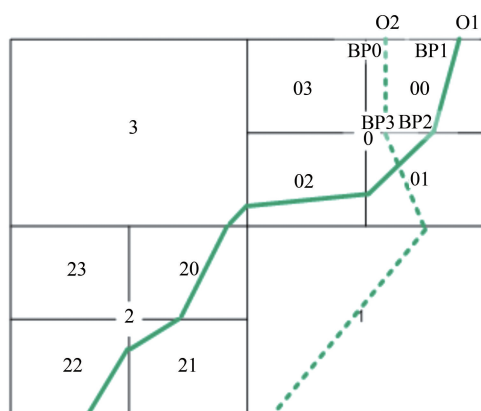


图3 格网建模^[68]

Fig.3 Spatial network cell model

分区的网络空间移动对象模型另一优势在于可预先计算节点及关键点之间的网络距离,提高网络空间移动对象查询效率。2004年Koladoudzan等^[69]提出一种NVD(Network Voronoi Diagram)模型,将空间网络利用Voronoi图划分成不同区域,首先,利用静态POI(如图4(a)中的 p_1, p_2, p_3)根据网络距离生成NVD区域,如图4(b)中的 $NVP(p_1), NVP(p_2), NVP(p_3)$;然后,预先计算NVP区域边界点之间及边界点与生成点之间的距离;最后,利用预先计算的快速实现网络空间移动对象相关查询。文献[70]提出的Island分区及文献[71]提出的Intersection-Oriented分区的网络空间移动对象模型也提出了类似的空间划分思想。

上述的网络空间移动对象数据库建模技术还

处于起步阶段。早期基于路段的网络空间移动对象模型,是从空间网络最本质的图结构出发,在现有的关系数据库之上设计移动对象位置建模方案。但是,简单图结构并不能够表达复杂真实空间网络,描述空间网络的拓扑关系。基于道路的网络空间移动对象模型虽然从一定程度上提高了网络空间移动对象模型的可用性,但是距离实际应用还有很大的距离,同时,还带来了网络距离计算的巨大开销。基于分区的网络空间移动对象模型通过采用离线的分区预计算方法,在计算效率方面有一定的改善,但是考虑到道路路段及POI可能存在的动态修改,这种空间换时间的分区方法也带来一定的计算成本与存储空间压力,模型的适用性也有一定的局限性。为了表达移动对象的复杂行为,将移动对象的动态变化的非空间属性引入建模过程,构建时空一体化的网络空间移动对象模型,是网络空间下移动对象建模的未来发展方向。

时空一体化的网络空间移动对象模型侧重于周围环境信息、状态信息与移动对象轨迹数据的统一建模。针对移动对象运动过程中产生的动态变化信息,2012年Sandu等^[72]提出了一种基于Spatial Profile的数据模型,此处的Spatial Profile是指随移动对象位置不断变化的属性值。该模型以文献[73]等提出的系统框架为基础,提出了2个新的数据类型 $smoving$ 与 $gmoving$,其中, $smoving$ 用来表达在自由空间中的动态属性值, $gmoving$ 用来描述网络空间中移动对象的动态属性值,并给出了针对此类数据类型的相关操作符。针对通过数据挖掘手段获取的移动对象轨迹语义信息,目前的研究还集中在自由空间,针对网络空间的研究相对较少,文献^[74-75]给出了一个完整的语义轨迹模型的建模方案,对时空一体化网络空间移动对象表达具有重要的借鉴

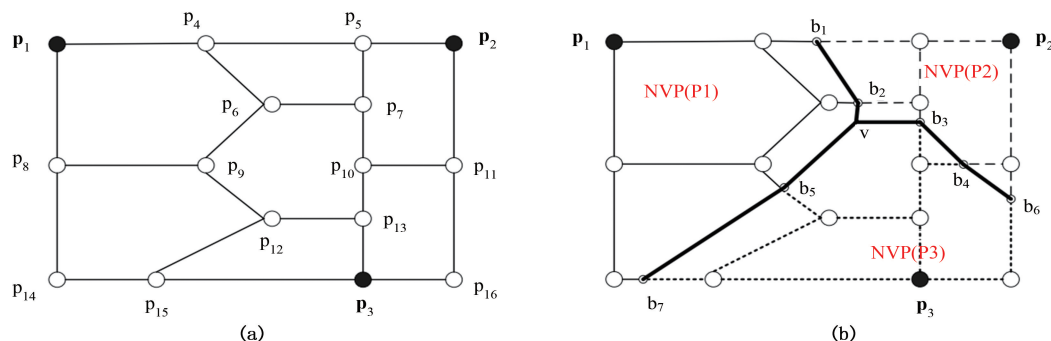


图4 网络Voronoi图模型^[69]

Fig.4 Network Voronoi diagram

意义。随着网络空间下移动对象相关应用的不断增多,数据挖掘手段的不断丰富,时空一体化的网络空间移动对象模型会不断完善。

6 结论与展望

随着基于位置的社交网络(Location-Based Social Networks)、物联网、智慧城市等新兴产业的飞速发展,社会计算等相关研究的不断深化,网络空间移动对象轨迹作为一种典型大数据的重要性会越来越凸显。另一方面,网络空间移动对象模型研究也是数据库管理系统、地理信息系统的重要研究方向。经过多年发展,虽然业界已经提出了一些网络空间移动对象模型,但远未满足实际需求,还存在许多尚未解决的问题:

(1)空间网络的复杂性表达问题。空间网络的表达是网络空间下移动对象建模的关键问题。例如,在道路网络中交叉口存在多种形式,如何有效构建模型,描述移动对象在交叉口附近的运动行为是网络空间移动对象模型研究的重点。此外,空间网络还包括其他的附属设施,如道路网络中的过街天桥,地下隧道等,都会影响移动对象模型的构建。另外,是空间网络的动态性及多尺度表达问题。移动对象会根据空间网络的动态性调整自己的行为,而且移动对象之间也会相互影响,需要在模型中考虑移动对象的运动规律。

(2)移动对象的时空行为表达问题。现有的模型研究的重点在于位置与轨迹的表达,但是模型中针对移动对象行为数据的组织管理研究相对较少。移动对象的行为包含两方面信息,一方面是移动对象个体的行为习惯,如偏爱的行驶道路、出行方式等;另一方面是群体移动对象行为,如Flock模式、Convoy等模式信息,周期模型^[76],Herd模式^[77]、Swarm模式^[78]、Flock模式^[79]等。

(3)海量数据实时处理问题。群体移动对象轨迹数据是典型的大数据。但是现有模型都缺乏针对大数据的优化策略,尤其是当数据量超出单机容量情况下,如何确定海量移动对象轨迹的表达方案。因此,分布式存储模型设计与查询优化是网络空间移动对象数据模型的一个重要研究方向。

(4)时空一体化建模问题。目前的网络空间移动对象模型仅着眼于移动对象本身的位置和轨迹的表达,从长远看,只有将丰富的语义信息如交通

模式、运动特点(停留区域,移动过程)、地理实体(如POI等),背景信息(工作地点、家庭住址等)、社会活动(如社交网络信息等)与移动对象轨迹表达过程有效融合,移动对象数据库才能在更多的应用领域发挥作用。

(5)移动空间的统一建模问题。移动对象与网络空间类型多样,不同运行环境建模方式存在差别,因此,时空一体化移动对象模型不仅限于网络空间下多种移动对象表达模型的融合,网络空间与自由空间、室内空间相统一的移动对象模型的融合也是未来发展的必然趋势。

(6)移动对象位置和轨迹不确定性问题。不确定性是移动对象轨迹数据的本质特征,是移动对象数据库无法避免的内在属性。如何在数据模型中表达移动对象位置和轨迹的不确定性,是网络空间移动对象数据模型面临的新挑战。

参考文献:

- [1] 陆锋,郑年波,段滢滢,等.出行信息服务关键技术研究进展与问题探讨[J].中国图象图形学报,2009(7):1219-1229.
- [2] Wolfson O. Moving objects information management: The database challenge[J]. Next Generation Information Technologies and Systems, 2002(2382):15-26.
- [3] Han J, Li Z, Tang L. Mining moving object, trajectory and traffic data[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [4] Wolfson O, Xu B, Chamberlain S, et al. Moving objects databases: Issues and solutions[C]. Scientific and Statistical Database Management, 1998,111-122.
- [5] Gao Y, Zheng B, Chen G, et al. Continuous nearest-neighbor search in the presence of obstacles[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2011,36(2):9-59.
- [6] Guting R H, Ding Z. Modeling and querying moving objects in networks[J]. TheVLDB Journal, 2006, 15(2): 165-190.
- [7] Jensen C S, Lu H, Yang B. Graph model based indoor tracking[C]. Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, 2009,122-131.
- [8] Zheng Y, Xie X. Learning transportation mode from raw GPS data for geographic application on the web[C]. // Proceedings of International conference on World Wide Web, 2008,247-256.
- [9] Zheng Y, Zhang L, Xie X, et al. Mining interesting locations and travel sequences from GPS trajectories[C]. Proceedings of the 18th International Conference on World Wide Web, 2009,791-800.
- [10] Zheng Y, Zhang L, Xie X, et al. Mining correlation be-

- tween locations using human location history[C]. In Proceedings of ACM SIGSPATIAL Conference on Advances in Geographical Information Systems, 2010,472-475.
- [11] Zheng Y, Zhang L, Xie X. Recommending friends and locations based on individual location history[J]. ACM Transactions on the Web (TWEB), 2011,5(1):5-44.
- [12] Wei L Y, Zheng Y, Peng W C. Constructing popular routes from uncertain trajectories[C]. Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2012,195-203.
- [13] Yuan J, Zheng Y, Xie X. Discovering regions of different functions in a city using human mobility and POIs[C]. Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2012,186-194.
- [14] 陈传彬,陆锋,励惠国,等.城市路网信息融合的关键技术[J].地球信息科学学报,2009,11(4):520-525.
- [15] 周亮,陆锋,张恒才.基于动态中介中心性的城市道路网实时分层方法[J].地球信息科学学报,2012,14(3):292-298.
- [16] Aref W G, Ouzzani M. Data management challenges for computational transportation[C]. Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services, 2008,4-42.
- [17] Geers D G. Some research questions for computational transportation science[C]. Proceedings of the 5th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services, 2008,1-5.
- [18] 陆锋,段滢滢,臧志刚.短时交通预测的动态出行信息服务协同工作平台[J].地球信息科学学报.2009,11(5): 5617- 5622.
- [19] Hu H, Lee D L, Lee V. Distance indexing on road networks[C]. Proceedings of the 32nd International Conference on Very Large Data Bases, 2006,894-905.
- [20] Wolfson O, Chamberlain S, Dao S, *et al.* Cost and imprecision in modeling the position of moving objects[C]. Data Engineering, 1998,588-596.
- [21] Güting RH. Moving object databases[M]. United States: Morgan Kaufmann, 2005.
- [22] Forlizzi L, Güting R H, Nardelli E, *et al.* A data model and data structures for moving objects databases[C]. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2000,319-330.
- [23] Meng X, Ding Z. DSTTMOD: A future trajectory based moving objects database[C]. Database and Expert Systems Applications, 2003,444-453.
- [24] Jandt S. Network data model and BerlinMOD benchmark [DB/OL]. <http://dna.fernuni-hagen.de/secondo/> BerlinMOD/Network.html, 2010.
- [25] Kakoudakis I, Theodoulidis B. The TAU temporal object model[R]. Rapport de recherche TR-96-4, TimeLab, University of Manchester UMIST, 1996.
- [26] Allen J F. Maintaining knowledge about temporal intervals [J]. Communications of the ACM, 1983,26(11):832-843.
- [27] Güting R H. Graph D B: Modeling and querying graphs in databases[C]. Proceedings of the International Conference on Very Large Data Bases, 1994,297-297.
- [28] Becker L, Güting R H. The Graph D B. Algebra: Specification of advanced data models with second-order signature[R]. 1995.
- [29] Kanjilal V, Schneider M. Spatial network modeling for databases[C]. Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing, 2011,827-832.
- [30] Scarponcini P. Generalized model for linear referencing in transportation[J]. GeoInformatica, 2002,6(1):35-55.
- [31] Vonderohe A, Chou C, Sun F, *et al.* A generic data model for linear referencing systems[R]. Transportation Research Board: National Cooperative Highway Research Program, 1997(218):1-28.
- [32] Zhu Y, Zheng VW, Yang Q. Computing with Spatial Trajectories[M]. New York: Springer New York, 2011.
- [33] Giannotti F, Nanni M, Pinelli F, *et al.* Trajectory pattern mining[C]. Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2007,330-339.
- [34] Li X, Claramunt C, Ray C, *et al.* Progress in patial data handling[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [35] Wang H, Zimmermann R. Snapshot location-based query processing on moving objects in road networks[C]. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 2008.
- [36] Stojanovic D, Papadopoulos A N, Predic B, *et al.* Continuous range monitoring of mobile objects in road networks [J]. Data & Knowledge Engineering, 2008,64(1):77-100.
- [37] Mouratidis K, Papadias D, Hadjieleftheriou M. Conceptual partitioning: An efficient method for continuous nearest neighbor monitoring[C]. Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2005,634-645.
- [38] Demiryurek U, Banaei-Kashani F, Shahabi C. Efficient continuous nearest neighbor query in spatial networks using euclidean restriction[J]. Advances in Spatial and Temporal Databases, 2009(5644):25-43.
- [39] Huang Y K, Chen Z W, Lee C. Continuous k-nearest neighbor query over moving objects in road networks[J].

- Advances in Data and Web Management, 2009(5446): 27-38.
- [40] Jang S M, Yoo J S. Processing continuous skyline queries in road networks[C]. Computer Science and Its Applications, 2008,353-356.
- [41] Yiu M L, Mamoulis N, Papadias D. Aggregate nearest neighbor queries in road networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005,17(6): 820-833.
- [42] Sistla A P, Wolfson O. Temporal triggers in active databases[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1995,7(3):471-486.
- [43] Jensen C, Pedersen T, Speičys L *et al.* Data modeling for mobile services in the real world[J]. Advances in Spatial and Temporal Databases, 2003(2750):1-9.
- [44] Gupta S, Kopparty S, Ravishankar C. Roads, codes, and spatiotemporal queries[C]. Proceedings of the Twenty-third ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, 2004,115-124.
- [45] Hage C, Jensen C S, Pedersen T B *et al.* Integrated data management for mobile services in the real world[C]. Proceedings of the 29th International Conference on Very Large Data Bases, 2003,1019-1030.
- [46] Shekhar S, Yoo J S. Processing in-route nearest neighbor queries: A comparison of alternative approaches[C]. Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, 2003,9-16.
- [47] Le T T T, Nickerson B G. A data structure for I/O efficient search of objects moving on a graph[R]. Canada: Faculty of Computer Science, University of New Brunswick, 2009,1-13.
- [48] Vazirgiannis M, Wolfson O. A spatiotemporal model and language for moving objects on road networks[J]. Advances in Spatial and Temporal Databases, 2001(2121): 20-35.
- [49] Brinkhoff T. A framework for generating network-based moving objects[J]. GeoInformatica, 2002,6(2):153-180.
- [50] Ding Z, Güting R. Modeling temporally variable transportation networks[J]. Database Systems for Advanced Applications, 2004(2973):651-724.
- [51] Ding Z, Güting R H. Managing moving objects on dynamic transportation networks[C]. 16th International Conference on Scientific and Statistical Database Management, 2004,287-296.
- [52] Frentzos E. Indexing objects moving on fixed networks [J]. Advances in Spatial and Temporal Databases, 2003 (2750):289-305.
- [53] Almeida V T D, Güting R H, IV P I. Indexing the trajectories of moving objects in networks[J]. GeoInformatica. 20059(1):33-60.
- [54] Roh G P, Roh J W, Hwang S W, *et al.* Supporting pattern-matching queries over trajectories on road networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2011, 23(11): 1753-1758.
- [55] Huang Y K, Lin L F, Chung Y C, *et al.* Continuous min-max distance bounded query in road networks[J]. Web Technologies and Applications, 2012(7235):423-434.
- [56] Liu F, Hua K A. Moving query monitoring in spatial network environments[J]. Mobile Networks and Applications, 2012,17(2):234-254.
- [57] Jeung H, Yiu M L, Zhou X, *et al.* Path prediction and predictive range querying in road network databases[J]. The VLDB Journal, 2010,19(4):585-602.
- [58] Papadias D, Zhang J, Mamoulis N, *et al.* Query processing in spatial network databases[C]. Proceedings of the 29th International Conference on Very Large Data Bases, 2003,802-813.
- [59] Speičys L, Jensen C S, Kligys A. Computational data modeling for network-constrained moving objects[C]. Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, 2003, 118-125.
- [60] Speičys L, Jensen C S. Enabling location-based services—multi-graph representation of transportation networks[J]. GeoInformatica, 2008,12(2):219-253.
- [61] Jensen C S, Kolář J, Pedersen T B, *et al.* Nearest neighbor queries in road networks[C]. Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems,2003,1-8.
- [62] Chen J, Meng X, Guo Y, *et al.* Modeling and predicting future trajectories of moving objects in a constrained network[C]. The 7th International Conference on Mobile Data Management, 2006,156-156.
- [63] 陆锋,周成虎,万庆.基于特征的城市交通网络非平面数据模型[J].测绘学报,2000(4):334-341.
- [64] Xu J, Güting R H. Manage and query generic moving objects in SECONDO[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2012,5(12):2002-2005.
- [65] Xu J, Güting R H. A generic data model for moving objects[J]. GeoInformatica, 2012,17(1):125-172.
- [66] Qi L, Schneider M. MONET: Modeling and querying moving objects in spatial networks[C]. ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming (IWGS), 2012.
- [67] Ding Z, Huang G. Real-time traffic flow statistical analysis based on network-constrained moving object trajectory

- ries[J]. Database and Expert Systems Applications, 2009 (5690):173-183.
- [68] Kim D O, Lee K J, Hong D S, *et al.* An efficient indexing technique for location prediction of moving objects[J]. Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 2007(4693):1-9.
- [69] Kolahdouzan M, Shahabi C. Voronoi-based k nearest neighbor search for spatial network databases[C]. Proceedings of the Thirtieth International Conference on Very Large Data Bases, 2004(30):840-851.
- [70] Huang X, Jensen C, Šaltenis S. The islands approach to nearest neighbor querying in spatial networks[J]. Advances in Spatial and Temporal Databases, 2005(3633):73-90.
- [71] Bok K, Yoon H, Seo D, *et al.* Indexing the current positions of moving objects on road networks[J]. Advances in Web and Network Technologies, and Information Management, 2007(4537):247-252.
- [72] Sandu Popa I, Zeitouni K. Modeling and querying mobile location sensor data[C]. The Fourth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services, 2012, 222-231.
- [73] Güting R H, Böhlen M H, Erwig M, *et al.* A foundation for representing and querying moving objects[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2000,25(1): 1-42.
- [74] Parent C, Spaccapietra S, Renso C, *et al.* Semantic trajectories modeling and analysis[J]. ACM Computing Surveys, 201345(4):39-76.
- [75] Spaccapietra S, Parent C. Adding meaning to your steps (Keynote Paper)[C]. International Conference on Conceptual Modeling, 2011,13-31.
- [76] Li Z, Ding B, Han J, *et al.* Mining periodic behaviors for moving objects[C]. Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2010,1099-1108.
- [77] Huang Y, Chen C, Dong P. Modeling herds and their evolvments from trajectory data[J]. Geographic Information Science, 2008(5266):90-105.
- [78] Li Z, Ding B, Han J, *et al.* Swarm: Mining relaxed temporal moving object clusters[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2010,3(1-2):723-734.
- [79] Benkert M, Gudmundsson J, Hübner F, *et al.* Reporting flock patterns[J]. Computational Geometry, 2008, 41(3): 111-125.

Advance in Moving Object Data Modeling under Geographic Network Environment

ZHANG Hengcai*, LU Feng and CHEN Jie

(State Key Laboratory of Resources and Environmental Information system, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In recent years, along with the rapid development of location technologies such as GPS, RFID and wireless sensor networks as well as the widespread use of location-aware devices such as mobile phones and GPS receivers, large amounts of trajectories of moving objects can be easily acquired. By using moving objects databases, massive trajectories of moving objects can be manipulated and handled for various applications, which makes the study of moving objects databases more and more important. Among the most recent researches, the study space where moving objects travel can be mainly divided into two types, the Euclidean space and the geographic road networks. In Euclidean space, moving objects can move freely. However, under geographic network environment, moving objects are limited to geographic networks and must follow the road regulation. For the latter research branch is much more practical than the former one, this paper concerns the latter branch and focuses on modeling moving objects in geographic networks, which is the foundation of the study of moving objects databases. It has been a hot research topic in the field of moving objects database management and also provides key technology for many other areas such as transportation, location-based services, urban mobility and social computing. Although it is of great theoretical significance and application value, modeling moving object

in geographic networks challenges the research community a lot due to network constraints. In this paper, firstly, most existent geographic network-constrained moving object data models over recent decades has been systematically reviewed and classified. The related literatures show that most geographic network-constrained models can be divided into four categories including edge-based network-constrained model, route-based network-constrained model, partition-based network-constrained model and spatial-temporal network-constrained model. Then model characteristics, advantages as well as limitations have been elaborately analyzed, based on which, finally some crucial points on modeling moving objects in geographic networks has been proposed and discussed.

Key words: moving objects databases; spatial network; data model; trajectories

*Corresponding author: ZHANG Hengcai, E-mail: zhanghc@lreis.ac.cn

国家地球系统科学数据共享平台及最新发布数据简介

国家地球系统科学数据共享平台(以下简称“本平台”)是以分散科研数据整合共享为重点的科技部、财政部首批通过认定的23个国家科技基础条件平台之一。

1 科技资源概况

本平台数据资源以陆地表层系统数据为核心,涉及固体地球、日地系统数据等,总数据量30.12TB,涵盖18个学科、5个国际数据镜像数据库、1500多个国际数据站点导航。

主要包括:全国尺度的地表过程与人地关系数据,典型区域地表过程与人地关系数据(极地、青藏高原、黄土高原、黄河中下游、东北黑土区、寒区旱区、西南山地、长江三角洲、东南沿海、南海及邻近海区、新疆与中亚区域等),日地系统与空间环境数据(地球物理、空间科学、天文科学数据等),对地观测数据及产品,以及国际数据资源等。

2 服务成效

截至目前,本平台实名注册用户共计67 522名,网站总访问人次1200多万(12 587 072),向科技界和社会公众提供了55.67TB的数据服务量。为1417项重大科研项目/课题,24项重大建设工程,26项民生工程提供了有效的数据服务,取得了显著的社会经济效益。

为了支持芦山地震救援及灾后重建,本平台于2013年5月21日启动“四川芦山地震救灾

专题数据直通车”,形成雅安及周边地区人口社会经济、行政区划、地形地貌、气候、土地等内容的主题数据库,免费向全社会提供直接下载。截止到5月20日24时,已提供下载3668人次,提供下载数据量1441GB,取得了良好的社会效益。

3 最新发布数据(部分数据集)

中国分县社会经济与人口统计数据(2005-2010)	全国近代气温数据集(162个站点)
长江中下游主要水文站数据	黄河流域重点水文站水文泥沙数据集
全国流域分级数据(2005-2006)	长江三角洲范围城市建成区用地变化数据(2002-2003年)
全国水系分级数据(2005-2006)	中国中北部1800年集成降水数据
中亚基础地理数据(2010年)	新疆生态环境数据
青藏高原东缘森林生态系统观测数据集	黑河流域1:100万土壤数据集(第二次土壤普查)
中国历次南北极考察数据	西北内陆河地区水资源数据集

4 数据服务联系方式

联系电话:(010)6488-8143/8145;

Email: geodata@igsnrr.ac.cn

数据服务网站: <http://www.geodata.cn>

(杨雅萍 供稿)