

一种基于道路网络的时空索引

李雪飞¹ 傅佩红² 刘经南^{1,3}

(1 武汉大学GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)
(2 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)
(3 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

摘 要: 针对现有的基于道路网络的时空索引的不足, 提出了一种新的针对在给定道路网络中运动的移动目标索引结构——MONG-Tree, 并对该索引的多种查询算法进行了具体的描述。
关键词: 移动目标数据库; 时空索引; MONG-Tree
中图法分类号: P208

移动目标数据库 (moving object database, MOD) 是近年来数据库研究领域发展起来的一个分支。移动目标数据库中记录了不同的移动目标在不同时刻的位置, 用户可以在数据库中查询移动目标的过去、现在和未来一定时刻的状态^[1]。MOD 中一个重要的研究方向是如何对随时间连续运动的移动目标建立时空索引, 从而有效地对复杂的时空数据进行存取和查询。时空索引是时空数据结构的重要组成部分, 在时空查询中占有重要的地位^[2]。

当前, 大多数对移动目标建立索引的方法, 如 3D R-Tree、HR-Tree、TB-Tree 等都假设移动目标在任意二维空间中作自由运动, 然而在现实生活中, 移动目标通常在一个约束的二维空间中运动。因此, 将移动目标在二维空间中的运动场景分为三类: 无约束运动场景、约束运动场景和交通网络运动场景^[3]。其中, 对在第三种运动场景中运动的移动目标建立有效的时空索引是十分必要的。

MON-Tree (moving objects in networks tree) 是目前常用的一种针对在道路网络中运动的移动目标建立的索引结构^[4]。但 MON-Tree 索引结构存在着一个主要问题: 对道路网络中运动的移动目标的运动信息中的空间信息建立了索引, 但缺乏对时间信息的索引, 从而降低了查询操作的效率。针对 MON-Tree 的不足, 本文提出了一种新的索引结构——基于道路网络的移动目标

复合树 (moving object in network composite tree, MONG-Tree)。

1 MONG-Tree 索引结构

1.1 道路网络模型

MONG-Tree 使用了基于路线的模型。在模型中, 道路网络用路线和路线间的交叉口表示。如道路网络 $G = (R, J)$, 其中, R 是路线的集合, J 是交叉点的集合。路线 $r \in R$ 与一条折线 $l_r = p_1, \dots, p_k$ 相关联, p_i 是二维点, $1 \leq i \leq k$, k 是边的数目。路线 r 的位置 p_r 由 0 和 1 之间的实数表示, 0 表示位置接近于点 p_1 , 1 表示位置接近于点 p_k 。交叉点 $j \in J$ 由两条路线 r_1 和 r_2 以及两条路线的位置 pos_{r_1} 和 pos_{r_2} 表示。移动目标在图 G 中的位置域为 $D'(G) = R \times \text{pos}$, 时间由时间域 T 中同形的实数给出。该道路网络模型是一个子函数 $f: T \rightarrow D'(G)$ 。图 1 显示了基于路线的道路网络模型。

关于使用基于路线模型的道路网络结构的详细描述可见文献[5]。使用基于路线模型而不是基于边模型最实际的原因是考虑到使用这种方法对移动目标建立索引能够减少数据量。另外一个原因是索引结构能够直接插入文献[4]提出的框架结构中。

1.2 索引结构

MONG-Tree 假设移动目标始终在图 1 所示

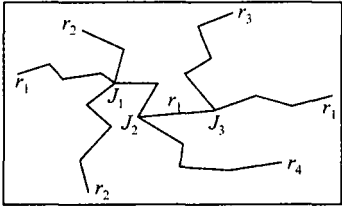


图 1 基于路线的道路网络模型
Fig.1 Network of Route Oriented Model

的道路网络模型中的折线中运动(折线与模型中的路线相对应)。MONC-Tree 的索引结构由 3 个 R-Tree 组成,分别是对折线空间对象建立索引的 2D R-Tree(顶部 R-Tree),对在折线中运动的移动目标的运动信息建立索引的 2D R-Tree(中部 R-Tree)和对道路网络中所有移动目标的运动时间建立索引的 1D R-Tree(底部 R-Tree)。

在对折线空间对象建立顶部 R-Tree 的同时,还建立了一个哈希结构折线对象和中部 R-Tree 之间的联系。哈希结构的记录形式是 $\langle \text{polyid}, \text{midtreepti} \rangle$, 其中, polyid 为折线的标识; midtreepti 是指向对应的中部 R-Tree 的指针。哈希结构对于移动目标的插入操作和查询操作起到优化的作用。

1) 顶部 R-Tree。在顶部 R-Tree 中,对折线对象的 MBB 建立索引。顶部 R-Tree 是一个二维 R-Tree,树的叶子结点结构为 $\langle \text{mbr}, \text{polypt}, \text{treept} \rangle$, 其中, mbr 是折线对象的最小邻接矩形; polypt 指向具体的折线对象; treept 指向与该折线对应的中部 R-Tree。非叶子结点结构为 $\langle \text{mbb}, \text{childpt} \rangle$, mbb 是包含所有子结点数据项的最小限定盒; childpt 指向子结点。

2) 中部 R-Tree。中部 R-Tree 用来对在折线中运动的移动目标的运动状态建立索引。中部 R-Tree 也是一个二维 R-Tree。移动目标的运动状态通过位置间隔 (p_1, p_2) 和时间间隔 (t_1, t_2) 表示, 其中, $0 \leq p_1, p_2 \leq 1$, p_1, p_2 用于存储在 t_1, t_2 时刻移动目标在折线中的相对位置信息。树的叶子结点结构为 $\langle \text{moid}, \text{polyid}, \text{mbb}, \text{movept} \rangle$, moid 为移动目标的标识号; polyid 为折线标识号; mbb 用于表示移动目标的运动间隔(即 p_1, p_2, t_1, t_2 组成的矩形); movept 指向保存该运动信息的具体存储地址。非叶子结点的结构为 $\langle \text{mbb}, \text{childpt} \rangle$, mbb 是包含所有子结点数据项的最小邻接矩形; childpt 指向子结点。

3) 底部 R-Tree。底部 R-Tree 对道路网络中所有移动目标的运动时间间隔建立索引。底部

R-Tree 是一个一维 R-Tree。树的叶子结点结构为 $\langle \text{moid}, \text{mbb}, \text{tpttr} \rangle$, 其中, moid 是移动目标的标识号; mbb 为移动目标对应的运动时间间隔。

对所有移动目标在道路网络中运动的时间间隔建立索引。树的叶子结点结构为 $\langle \text{moid}, \text{mbb}, \text{tpttr} \rangle$, moid 是移动目标的标识号; mbb 为移动目标对应的运动时间间隔; tpttr 为指向中部 R-Tree 对应的叶子结点指针。非叶子结点结构为 $\langle \text{mbb}, \text{childpt} \rangle$, mbb 是包含所有子结点数据项的最小限定盒; childpt 指向子结点。

MONC-Tree 具体的索引结构如图 2 所示。

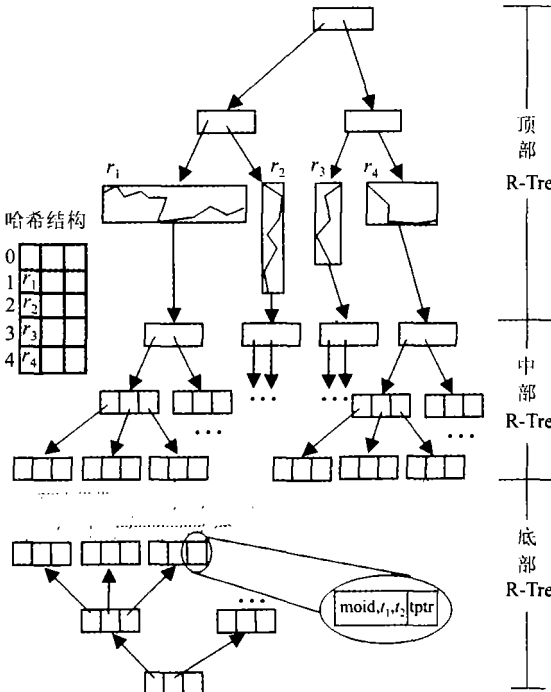


图 2 MONC-Tree 索引结构
Fig.2 MONC-Tree Index Structure

1.3 插入操作

基于道路网络的时空索引涉及到两种不同类型的插入操作:道路网络中网络空间数据的插入和移动目标运动状态的插入。在 MONC-Tree 中,对应的插入操作为折线插入和移动目标插入。在构建道路网络时,MON-Tree 进行折线插入操作,而当移动目标被创建或其运动向量发生改变时,需要进行移动目标插入操作。当移动目标从一条折线移动到另一条折线时,同样需要进行移动目标插入操作。

1.3.1 折线插入

在哈希结构中,用一个空指针插入折线标识号。当插入第一个经过该折线的移动目标后,再在顶部的 R-Tree 中插入折线,避免在顶部 R-Tree 中没有移动目标经过的折线存在,使其不参

与查询,并且保持顶部 R-Tree 尽可能小。道路网络中所包含的折线存储在分散的文件中。当首次建立索引时,扫描整个路线关系,在哈希结构中,添加指向中部 R-Tree 的空指针的数据项。需要特别指出的是,哈希结构并不包含所有的折线(数量可能非常大),而是指向折线关系中实际数据的指针。

1.3.2 移动目标插入

首先在顶部哈希结构中搜索相关联的折线,如果没有与中部 R-Tree 相关联的折线,则创建一个新的记录,将折线的 mbb 插入顶部的 R-Tree,并将中部 R-Tree 中新创建的指针在顶部的哈希结构中进行更新。在中部 R-Tree 中,矩形(p_1, p_2, t_1, t_2)使用 R-Tree 插入算法进行插入。对于底部的 1D R-Tree,根据中部 R-Tree 中新插入记录的时间间隔以及指向新记录的指针,利用 R-Tree 的插入算法进行插入操作。

1.4 查询操作

1.4.1 窗口查询

区域查询是指对于给定的一个时空查询窗口 $w = (x_1, x_2, y_1, y_2, t_1, t_2)$, 查找在时间间隔 $t = (t_1, t_2)$ 存在于区域 $r = (x_1, x_2, y_1, y_2)$ 中的所有移动目标。区域查询的一个变体是仅仅查询与查询窗口相交的移动目标的运动片段,称之为窗口查询。

MONG-Tree 的窗口查询算法主要分为三个步骤: ① 在顶部 R-Tree 中, 查询所有与空间查询窗口 r 相交的折线 mbb; ② 通过第一步查询结果中的折线的实际空间表示查询所有与折线相交的运动间隔, 查询结果为一个窗口集合 $w_0 = \{(p_{11}, p_{12}, t_1, t_2), \dots, (p_{n1}, p_{n2}, t_1, t_2)\}$, 如图 3 所示; ③ 在底部 R-Tree 中, 查询所有处于时间间隔 t 内的记录, 并通过记录指向中部 R-Tree 叶子节点的指针获取实际的运动信息, 将这些信息与步骤 ② 中的查询结果进行匹配, 获取两者的交集, 即为窗口查询的查询结果, 如图 4 所示。

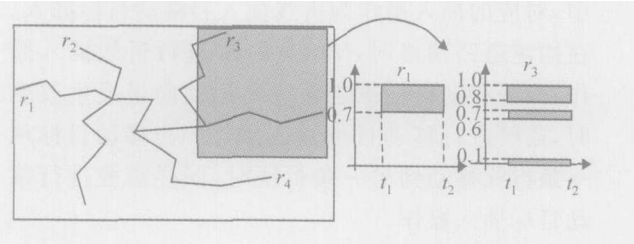


图 3 窗口查询第二步结果图

Fig. 3 Result of Window Query Step Two

1.4.2 轨迹查询

轨迹查询是指对于给定的移动目标标识

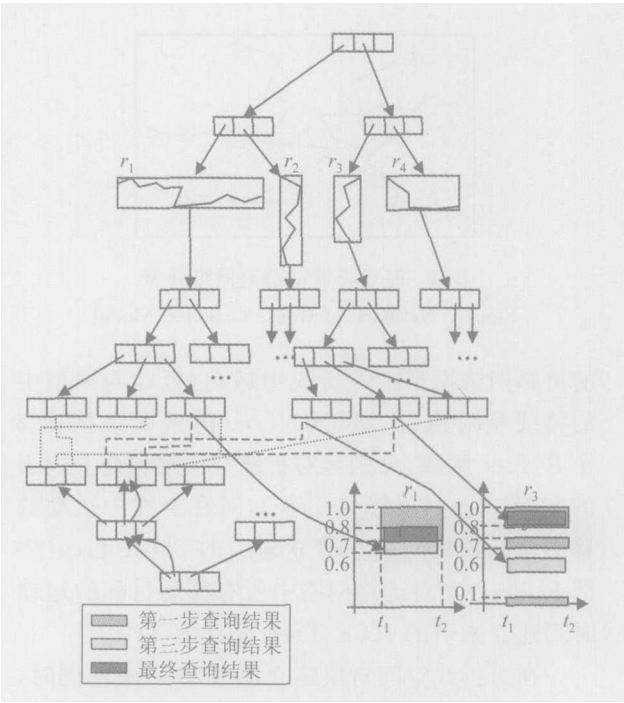


图 4 窗口查询最终结果

Fig. 4 Final Result of Window Query

moid 和时间间隔 $t = (t_1, t_2)$ 内所有的轨迹信息。MONG-Tree 的轨迹查询算法非常简单, 首先在底部 R-Tree 中查询时间间隔在 $t = (t_1, t_2)$ 内的叶子结点, 通过该结点对应于中部 R-Tree 叶子节点的指针得到对应的移动目标信息。然后判断查询到的移动目标信息中的移动目标标识是否为给定的移动目标标识 moid, 如果是, 则添加到查询结果中; 否则, 直接剔除。

2 试验比较

采用 Inter Pentium M 1.86 G 处理器、512 M 内存的硬件环境进行试验, 操作系统为 Windows XP Professional SP2, 编程工具为 Visual C++ 6.0。

采用文献[6]中提出的基于道路网络的移动目标生成器生成移动目标数据。道路网络数据采用武汉市 1: 1 000 比例尺的道路数据。

试验主要对 MON-Tree 和 MONGTree 两种索引结构的索引大小、窗口查询和轨迹查询效率进行了比较。由图 5 可以看出, 由于 MONG-Tree 在 MON-Tree 底部添加了一个对移动目标运动时间间隔建立的 R-Tree, 因此, MONG-Tree 在存储空间上略多于 MON-Tree。在进行窗口查询时, 当移动目标的运动时间间隔较小时, 使用 MON-Tree 比 MONG-Tree 访问 I/O 的次数较少, 但当时间间隔增长, MONG-Tree 的查询效率明显提高。在进行轨迹查询时, 由于 MONG-Tree 对移动目标

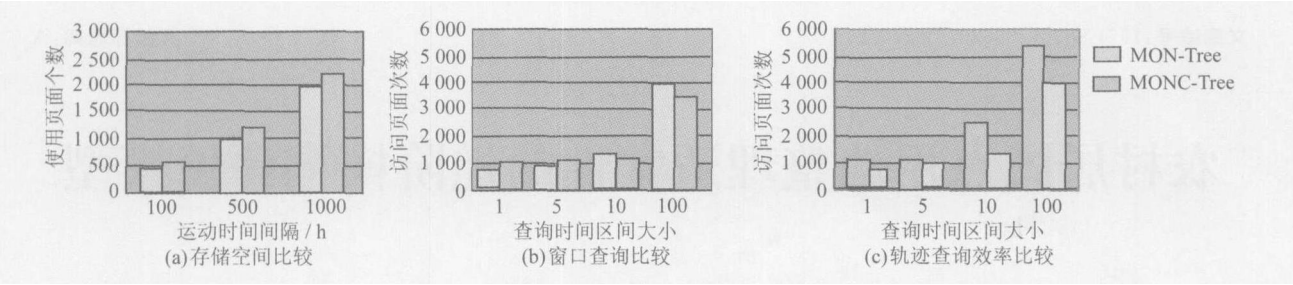


图 5 MON-Tree 和 MONG-Tree 的性能比较

Fig.5 Comparison of Performance Between MON-Tree and MONG-Tree

的时间间隔建立了单独索引,从而使访问 I/O 的次数明显减小,性能较 MON-Tree 明显提高。

通过图 5 可以看出,MONC-Tree 与 MON-Tree 相比,不仅保留了 MON-Tree 的道路网络模型和基本的存储操作,而且对其查询类型进行了扩展。同时,MONG-Tree 比 MON-Tree 在查询效率方面有了较大的提高,且 MONG-Tree 支持轨迹查询。因此,MONG-Tree 不失为一种较好的针对道路网络中运动的移动目标的索引结构。

参 考 文 献

[1] 于秀兰,陈滢,丁晓诚,等. 一种基于道路网络的移动目标数据库模型[J]. 软件学报, 2003, 14(9): 1600-1607

[2] 张山山,杨宗亮. 一种面向 GIS 的时空索引方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(1): 51-54

[3] Pfoser D, Jensen C S. Querying the Trajectories of

Online Mobile Objects [C]. The 2nd ACM Intl Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access (MobiDE), Santa Barbara, California, 2001

[4] Victor T D A, Ralf H G. Indexing the Trajectories of Moving Objects in Networks[J]. GeoInformatica, 2005, 9(1): 33-60

[5] Güting R H, de Almeida V T, Ding Z. Modeling and Querying Moving Objects in Networks [R]. Technical Report 308, Fernuniversität Hagen, Fachbereich Informatik, 2004

[6] Brinkhoff T. A Framework for Generating Network based Moving Objects [J]. GeoInformatica, 2002, 6(2): 153-180

第一作者简介: 李雪飞, 博士生。现主要从事 GPS 和 GIS 方面的研究。
E-mail: snowfly_li@163.com

Spatio-temporal Index Based on Networks

LI Xuefei¹ FU Peihong² LIU Jingnan^{1,3}

(1 Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 Presidential Secretariat, Wuhan University, LuoJia Hill, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new index structure for moving objects on networks, MONC-Tree is put forward, and the basic algorithms for querying of the index are presented in detail.
Key words: moving object database; spatio-temporal index; MONG-Tree

About the first author: LI Xuefei, Ph. D candidate, majors in GPS and GIS.
E-mail: snowfly_li@163.com