

电子地图道路网模型及其自动生成算法研究

张小国 王 庆 王 宁 万德钧

(东南大学仪器科学与工程系, 南京 210096)

摘 要 在分析了面向 ITS 的电子地图对道路信息需求的基础上,提出了基于路段节点连接的单路线电子地图道路网络模型,该模型可以很好地表述现实道路网络,同时还重点研究了电子地图制作中的道路网络数据库自动生成算法。该算法首先通过实体遍历,采用路段分离预处理算法使道路网络中的路段在交点处一一断开,然后通过建立路段端点表和路心线信息表,来动态修改两个搜索表,以实现道路跟踪,从而遍历整个道路网络。在整个搜索过程中,系统即自动对道路路段及节点进行自动编号,建立路段之间的连接关系,从而生成由相互关联的路段和节点组成的电子地图道路网络数据库。最后,还探讨了一些特殊情形的求交算法。实践证明,该算法有效可行。

关键词 电子地图 道路网络 数据库 智能运输系统 遍历

中图法分类号: TP208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)05-0481-05

A Study on Road Network Model in Digital Maps and the Automatic Generation Algorithm of its Database

ZHANG Xiao-guo, WANG Qing, WANG Ning, WAN De-jun

(Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract Firstly, this paper studies road information requirement of ITS-oriented digital maps. Single-lined road network model based on road-node-connection is presented. Conventional network based on road-segment-connection has some difficulties to represent real world road networks, however model presented in this paper works well and can be easily operated. Then, this paper mainly focuses the research of the study of automatic generation algorithm of road network databased of aforementioned model when digital maps is been making. Road-segment-breaking preprocess is adopted to break all road segment vectors from intersection points. Road nodes and segments information lists are created then, and through modifying the two lists, road network is traversed. Road segments and nodes are coded automatically when traversing, and at the same time topographical information is gotten. After this process, road network database can be constructed with road nodes and segments associating with each other. In the end, special cases of preprocess is discussed on intersection points getting. Experiences show that the model and algorithms presented in this paper are reasonable and feasible.

Keywords Digital map, Road network, Database, ITS, Traverse

0 前 言

智能运输系统 ITS(Intelligent Transfer System)有助于提高整体运输效率和保障人身安全,因而在交通运输工作中有很好的应用前景,但由于在

ITS 中,无论是车辆定位单元,还是交通管理系统都离不开电子地图的支持,因此建立准确而又能及时更新的电子地图道路信息数据库是 ITS 成功应用的关键,然而,其数据库的制作是极其繁琐的,因为它需要投入大量的人力和物力,而且由于一个城市或区域的电子地图数据库的建立仅仅是工作的开

始,而事实上,其维护、更新以及校正工作将贯穿于电子地图使用的始终,因此,建立合适的电子地图数据库模型,研究如何快速制作出适合车辆导航和交通监控所需的电子地图数据库有着极大的应用价值。

目前,常用的基于路段连接的电子地图道路模型的缺陷在于难以表达路段的拓扑关系,以及难以显示交通控制中的转弯限制,本文提出的基于路段节点连接的电子地图道路网络模型则可以较好地表述现实世界的道路网络。本文基于上述模型,提出了道路网络数据库的自动生成算法,该算法原理简单,且容易实现,能够很大程度地减少电子地图制作的工作量和缩短制作时间,因此有很好的实用价值。

1 ITS 对电子地图的信息需求

面向 ITS 的电子地图通常为矢量格式,且它应具有一定精度和足够信息,并且数据应完整无缝(包括几何完整性和拓扑一致性),ITS 中的交通监控以及车辆定位单元中的地图匹配(MM-Map-Matching)、路线制导(RG-Route Guidance)等多项功能都不能脱离道路网络数据库的支撑。

面向 ITS 的电子地图数据库需要如下道路或路段信息:(1)道路的几何属性信息;(2)道路的名称、道路 ID、行驶方向信息(用来表示单行线或者是步行街);(3)道路的形式信息(汽车高速公路、双向行车道、环道或是停车场);(4)道路的级别(主干道、辅助干道等)、路长、路宽以及一般流量、高峰流量以及道路滞流量信息;(5)最大长度、最大高度、最大宽度、最大载重信息;(6)特定的交通限制信息(如不对危险物品开放,收费信息等);(7)道路路段对应的节点 ID 信息;(8)相邻的可通行路段 ID 信息(若相邻路段不可通行实际上即表示了转弯限制);(9)其他附加信息。

面向 ITS 的电子地图数据库应当包括下述节点信息:(1)节点的几何位置信息(可以用直角坐标或经纬度表示);(2)每一个节点都应有其相邻可直接达到节点的信息;(3)每一个节点都应有和相邻节点连接(路段)的信息;(4)红绿灯信息;(5)其他附加信息,如道路和河流或铁路的交点信息。

除此之外,区域信息、兴趣点(如银行、商业中心、停车场等)信息、河流,以及其他交通形式的数据库对 ITS 应用也很重要,限于篇幅,此处不予详述。

2 基于路段节点连接的电子地图道路网络模型

图 1 显示了道路网络的基本拓扑关系和几何元素^[1],图中节点反映了道路段与道路段的交点或路段终点;形状点是指同一条非直线道路上的转弯点;而路段的穿越则反映了路段之间的邻接关系。节点可以用二维或者三维的坐标表示,节点和节点的联系可以用连接两点的直线(直线道路)或者多义线(曲线道路)表示,而且两条相邻的边若构成一个道路段穿越,则它即可反映现实道路的邻接拓扑关系。

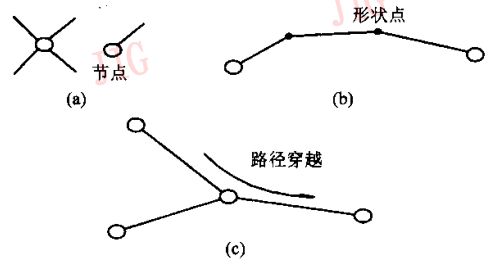


图 1 道路网络中的几何元素和拓扑关系

目前应用于车辆导航或交通监控的道路模型多为基于路段连接的电子地图道路网络模型^[1~7],其形式化定义为

$$\begin{cases} R_W = (N, R) \\ N = \{x | x \in N_S\} \\ R = \{N_R\} \\ N_R = \{\langle x, y \rangle | L(x, y) \wedge (x, y \in N)\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R_W 代表道路网络; N_S 是道路的节点集; N_R 表示了道路网络两个节点的拓扑关系集合; 无序对 $\langle x, y \rangle$ 则表示节点 x 和 y 之间的一条边; 谓词 $L(x, y)$ 表示了节点 x 到 y 的通路。节点和节点连接的权可以用节点之间的几何长度或者长度和其他因素的加权和来表示。

上述道路模型思维直观,形式简洁,可以表述出现实世界道路网络的大多数情形。但是也存在一些缺陷,如:(1)难以表达转弯限制;(2)很难表示两节点存在多条道路和环路的情形,尽管这种情形在现实世界中并不多见;(3)在地图匹配时,由某一路段得到其相邻路段都需要经过路段→节点→路段的转换过程,不直观也不利于程序实现。

为了解决上述问题,本文提出基于道路节点连接的道路网络。其原理是将道路路段看成道路网络的核心单元(道路网络对应图的节点),而将道路节

点看成路段的连接元素. 其形式化定义为

$$\begin{cases} R_W = (N, R) \\ N = \{x | x \in R_S \\ R = \{N_R\} \\ N_R = \{\langle n_1, n_2 \rangle | L(x, y) \cdots (x, y \in N)\} \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_W 同样代表道路网, R_S 是道路的有向路段集, N_R 表示了道路网络两个路段的拓扑关系集合, 有序对 $\langle n_1, n_2 \rangle$ 表示了有向路段, n_1 可以通行到有向路段 n_2 , 谓词 $L(x, y)$ 表示了连接有向路段 n_1 到有向路段 n_2 的道路节点. 该道路网络模型的特点在于:

(1) 任何一条双向道路路段都对应于两个有向路段, 当某个实际路段为单向时, 该地理实体仅对应一条有向路段.

(2) 由于道路网络是以路段为网络节点, 所以可以很方便地表示转向限制, 而且假如相邻的路段可以通行的话, 道路网络就建立了一个以节点为连接的联系.

(3) 在道路路段中本身存储了起始和终止节点的信息, 因此上述模型可以方便地由路段获取节点, 或由节点获取其连接的路段信息.

每个有向路段连接的其余有向路段数是有限的 (通常小于 4), 上述道路模型是不带权的不完全稀疏图. 由有向路段可以得到相应的道路节点, 道路的通行由有向路段的连接表示, 路段的形状点依托于路段而存在. 上述数据模型可以保证最优路径搜索以及地图匹配算法能够顺利地地图地理信息进行操纵.

3 道路网络的数据库自动生成算法研究

3.1 路段分离预处理算法

目前用于导航的电子地图模型中, 不论是欧洲的 GDF 标准^[6~7], 美洲的 STDS 标准^[4,7] 还是日本的 JDRMA 标准^[5], 矢量实体构成要素都是点和线段, 而道路模型多为单路线 (single-lined) 型^[1~7]. 对于纸质地图矢量化的矢量源图, 道路路心线需要用户通过手工的方式添加. 而航拍或遥感图象中的公路网络经过线状特征提取可以直接得到道路中心线^[8].

下面讨论道路网络图的路段分离预处理算法. 该算法的作用在于将道路中心线在道路交叉点处一打断, 最终使得道路网络中不存在穿越交点的路心线实体.

用 C 类语言定义 MAPELEMENTINFO 数据

结构如下:

```
struct MAPELEMENTINFO
{
    CmapElement * pElement;
    // 实体指针, 指向路心线实体
    FPointList IntersectionPoint;
    // pElement 和其他实体相交的交点集
};
```

假设原始路心线实体个数为 N , 该算法可以用如下过程表示:

(1) 从实体集中取出第一实体, 求出它和其他所有 $(N-1)$ 个实体的交点, 若新交点与存在的交点距离小于既定值则认为是同一交点, 否则认为是新的交点, 将之加入交点集; 在得到本实体交点的同时, 将该交点加入与之相交的实体交点集中, 若该交点与实体已存在的某交点的距离小于某个设定值, 则认为是同一交点而不加入;

(2) 从实体集取出第二个实体, 求出该实体和剩余 $(N-2)$ 个实体的交点, 对交点的加入方式同 1;

(3) 依次取出第 I 个实体, 求其和剩余 $(N-I)$ 实体的交点, 对交点加入 MAPELEMENTINFO 结构的方式同前, 持续这个过程直至遍历尽所有实体;

(4) 重新遍历实体, 将每个存在交点的实体在交点处一一断开, 从而得到新的实体集.

3.2 路段跟踪算法

经过预处理后, 道路路心线实体均被相应交点一一断开, 此时可以用道路追踪算法遍历整个道路网络, 从而获得所有的路段和节点以及相应的邻接信息. 定义如下数据结构:

```
struct ELEMENTADJ
{
    CMapElement * pElement; // 路心线实体
    CNode * pNode1; // 路段端点 1
    CNode * pNode2; // 路段端点 2
    PMapElementList ElementList1;
    // 和某路心线一端端点 1 邻接的路心线
    PMapElementList ElementList2;
    // 和某路心线另一端端点 2 邻接的路心线
}; // 结构, 反映了道路路段实体和其相邻实体的关系

class CElementAdjList ElementAdjList;
// 表, 存储 ELEMENTADJ 节点

class CNodeList NodeList;
// 表, 存储路段交点和端点
```

其中, 类 CNodeList 被设计用以存储道路路段端点, 类 CElementAdjList 也是一个表, 用以存储

将该表节点从 ElementAdjList 表中删除;若该实体不存在于 ElementAdjList 表中,则生成表节点,并将其写入实体相邻信息,再加入 ElementAdjList 表中。②若实体在该端点处相邻实体集为空,不进行任何操作。

- (1) 遍历路心线实体并编号;
- (2) 得到第一个实体后,即得到两端点信息,再将两端点信息加入端点表 NodeList,并编号;
- (3) 求与当前实体两个端点相连的路心线实体集,并生成若干相应的 ELEMENTADJ 型节点加入 EelementAdjList 表,同时将实体相邻信息加入各个实体对应节点的 ElementAdjList1 成员中;
- (4) 取出 ElementAdjList 中最后一个实体,即得到其另一端端点,将端点加入端点集 NodeList,并为之编号,即得到与此端点相邻的所有实体信息,并将这些实体添加到其成员 ElementList2 中,再将本实体的对应信息写入数据库,并弹出本节点,删除相应信息,同时和端点邻接的其余实体也可以得到相邻实体的信息,并生成这些实体对应的 ELEMENTADJ 节点,然后加入 ElementAdjList 表中。
- (5) 继续得到 ElementAdjList 中最后一个实体,从而得到其另一端端点,将之加入端点表 NodeList,得到相应的相邻实体集,再将本实体的对应邻接和端点信息写入数据库,并将与本实体对应的 ElementAdjList 中的节点删除。①若实体集非空,逐个判断相邻实体是否已经存在于 ElementAdjList 表中,若已经存在,则将实体相邻信息加入相应的表节点中,并将信息写入数据库,再

(6) 继续执行步骤(5)的操作,直至表 ElementAdjList 为空为止。

(7) 遍历端点表, 将所有端点信息写入数据库.

由于已经进行了路心线断开的预处理, 一个端点相邻的实体集可以直接比较端点坐标而不需要经过求交运算. 另外, 数据库可以采用 RDBMS 的数据库引擎 (如 ODBC, DAO 或 BDE 等) 生成.

图 2 是一个简化的道路网络图,表 2 反映了该道路网络的道路数据库自动生成的过程.表中弹出实体实际上是指弹出对应的搜索节点,其伴随的动作是将道路及路段邻接信息写入数据库.

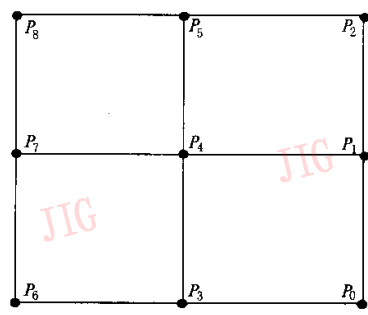


图 2 简化的道路网络

表 2 一个简化道路网络的跟踪搜索过程

步骤	NodeList	型表中路段端点	ElementAdjList 表中 节点对应路段	说明
1				得到第一个实体 P_0P_1
2	P_0	P_1	P_0P_3 P_1P_4 P_1P_2	得到 P_0P_1 在 P_1, P_0 端的邻接实体, 将 P_0P_1 写入数据库
3	P_0	P_1 P_2	P_0P_3 P_1P_4 P_2P_5	得到 P_1P_2 在 P_2 端的邻接实体, 弹出 P_1P_2
4	P_0	P_1 P_2 P_5	P_0P_3 P_1P_4 P_5P_8 P_5P_4	得到 P_2P_5 在 P_5 端的邻接实体, 弹出 P_2P_5
5	P_0	P_1 P_2 P_5 P_4	P_0P_3 P_5P_8 P_4P_7 P_4P_3	得到 P_5P_4 在 P_4 端的邻接实体, 弹出 P_2P_5, P_1P_4, P_5P_4
6	P_0	P_1 P_2 P_5 P_4 P_3	P_0P_3 P_5P_8 P_4P_7 P_3P_6	得到 P_4P_3 在 P_3 端的邻接实体, 弹出 P_4P_3, P_0P_3
7	P_0	P_1 P_2 P_5 P_4 P_3	P_5P_8 P_4P_7 P_3P_6 P_6P_7	得到 P_3P_6 在 P_6 端的邻接实体, 弹出 P_3P_6
8	P_0	P_1 P_2 P_5 P_4 P_3 P_6 P_7	P_5P_8 P_4P_7 P_6P_7	得到 P_6P_7 在 P_7 端的邻接实体, 弹出 P_6P_7, P_7P_4
9	P_0	P_1 P_2 P_5 P_4 P_3 P_6 P_7 P_8	P_5P_8 P_7P_8	得到 P_7P_8 在 P_8 端的邻接实体, 弹出 P_7P_8, P_5P_8

由于电子地图用于 ITS 的前提之一是道路网络必须是强连接的,即在道路网络中的任何两个位置肯定存在双向的通路,因此上述针对于简化的道路网络搜索过程对于一般强连接道路网络也是可行的.

4 讨 论

4.1 预处理求交算法

gle-lined road) 模型, 通常矢量化不能提供该路心线, 因此它必须通过人工输入的方式得到, 可行的方法是矢量化后输出 DXF 格式的图形文件, 用计算机辅助作图软件 (如 AutoCAD) 较强的编辑功能进行尽可能准确的添加。但是, 路心线的添加是极其繁琐费时的, 即使熟练的制图人员也很难保证不发生差错; 此外, 对于航拍图象, 用矢量化算法获取的路心线可能会产生实体断裂的情形。当本来相连的实体因为矢量化过程导致断裂时, 有可能导致路段追踪

目前使用的道路模型均为单路线型道路(single-line road)

失败,为了避免上述情形的发生,可以对实体求交算法增加允许误差限.

目前用于导航的电子地图模型中,矢量实体构成要素都是点和线段.面和多义线的构成元素都是线段,因此预处理过程中直线的求交算法是关键.考虑了误差的改进线段求交算法可以表述为:

(1) 当两个线段对应的直线重合且两直线段的端点也重合时,认为两者的共同端点是两者的交点.

(2) 当两线段对应直线重合但两者没有重合线段时,如两者相近端点之间的距离小于某个设定值,则认为两者相交,交点取两个相近端点的中点.

(3) 当两线段对应的直线是相交的,但是交点至少在其中一条线段的延长线上时,可以判定两线段相近的一对端点的距离值,若两者距离值小于某给定值,则可以认为两者是相交的.

(4) 当两直线段平行时,若其中一条线段的端点到另一条线段的最近距离小于用户设定的某值时,则认为两直线相交,交点取相应成最小距离的点(不一定是垂点).

4.2 算法复杂性分析

假设道路网络中有 n 个路段端点及 m 个路段.上述道路网络数据库的自动生成算法的基本操作是访问道路网络的路心线实体,对道路网络的跟踪是通过求实体端点相邻的实体完成的.每一次道路网络跟踪都拓展一个路段节点,并且对于道路网络中的任何一个实体,只要其两个路段端点被拓展过,则其相邻的可通行路段信息可以全部获取,这意味着当道路网络的所有节点被拓展时,可以获取全部的路段及其可通行路段信息,所以本算法的时间复杂度为 n .另外,搜索过程中使用了两个表分别存储路段端点和路段附加信息,由于端点表最多存储 n 个端点,所以其空间复杂度为 n ,而路段附加信息表最多存储 m 个节点,所以空间复杂度为 m .因此,不论是时间复杂性还是空间复杂性,这种道路跟踪算法都是线性的.

5 结 语

(1) 本文提出的基于道路节点连接的电子地图道路网络模型可以较好表示现实世界道路网,它具有基于路段连接的道路模型的一切优点,并且可以表达基于路段连接模型很难表达的转弯限制及道路穿越等拓扑关系.

(2) 本文提出的道路网络数据库自动生成算法原理简单、易于实现.利用该算法生成的数据库具备了道路网络的几何和拓扑属性,只要经过适当的修改,就可以应用于 ITS 应用(如车辆导航,交通控制,电子收费)中.此外,对于基于路段连接的道路网络模型本算法同样适用.

(3) 基于上述道路模型和算法,我们以常熟市市区为例开发了具有地图匹配,路线制导功能的车载 GIS,应用表明本文提出的算法切实可行,并且可以加快电子地图的制作.

参 考 文 献

- 1 Wieser M. Digital road maps and path optimization applied to vehicle navigation system. In: Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS(GISM Courses and Lectures. No. 365), L. Musio *et al*(Eds). Springer-Verlag Wien New York, 1996.
- 2 Car A *et al*. Modelling a hierarchy of space applied to large road networks. In: IGIS'94: Geographic Information Systems, J. Nievergelt *et al* (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994;15~24.
- 3 Raymond A Cass *et al*. Building navigable database for the real world. In: The 3rd International Conference on Vehicle Navigation&Information System. 1992;585~590.
- 4 Susan Scott. Status and direction of map database standards efforts in North America. In: IEEE-IEE Navigation& Information System Conference, Ottawa-VNIS. 1993.
- 5 Masao Shibata. Current status and future plans for digital map databases in japan. In: IEEE-IEE Navigation& Information System Conference, Ottawa/VNIS. 1993.
- 6 Hinrich Claussen. Status and directions of digial map databases in Europe. IEEE-IEE Navigation& Information System Conference, Ottawa-VNIS. 1993.
- 7 Albert J. Geospatial information standards, a comparative study of approaches in the standardization of geospatial information. Computer & Geoscience, 1999, (25), 9~23.
- 8 曹五丰,李树祥,朱建民等. 基于知识的卫星数字图象公路信息提取. 北京大学学报(自然科学版)百年校庆纪念专刊. 2000, 34: 254~263.

张小国 1973 年生,东南大学仪器系博士研究生.研究方向为车载 GIS 理论及应用.

王 庆 1962 年生,博士,东南大学仪器系副教授.研究方向为 GPS 理论和应用.

王 宁 1976 年生,东南大学仪器系硕士研究生.研究方向为车载 GIS 理论和应用.

万德钧 1932 年生,教授,博士生导师,东南大学仪器系.研究方向为导航和测控技术.