

文章编号: 1001-2486(2009-05-0081-05)

# 一种面向多制式路径规划的网络模型\*

吴京, 刘露, 李骏

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 随着综合交通运输与导航应用技术的发展, 综合利用多种交通方式实施路径规划的应用需求日益迫切, 传统的单一制式路径规划系统与服务正在向多制式的方向发展。然而, 传统的路径规划模型与算法难以直接应用在多制式的条件下。针对多制式路径规划的特点, 构建合理的数据模型是解决该问题的基础。为此, 提出了制式切换点的概念, 并以此为基础建立了包含多制式图集合、顶点属性表和切换点矩阵三个主要部分的多制式网络模型, 并在真实的城市道路网数据集上进行了多制式网络构建实验。该工作能够从理论和实践两个方面为多制式路径规划算法的设计提供基础性的技术支持。

**关键词:** 制式切换点; 多制式路径规划; 图论; 导航; 智能交通系统

中图分类号: TP301 文献标识码: A

## A Network Model for Multimodal Route Planning

WU Jing, LIU Lu, LI Jun

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** With the fast development of the transportation and navigation technology, the application of multimodal route planning is becoming popular. The routing systems and services are evolving from monomodal to multimodal. However, it is difficult to apply the traditional data models and algorithms directly to the multimodal situation. A reasonable data model must take the multimodal application background into account, which is considered the critical foundation of the multimodal route planning solution. For the purpose of building such a model, we propose a concept named Switch Point, and a multimodal network model which consists of three components: multimodal graph set, vertices attributes table and switch point matrix. The experiments conducted on the real urban transportation road networks showed the feasibility of our proposed model. Our work can provide a foundation to support the study on multimodal route planning algorithms both theoretically and practically.

**Key words:** switch point; multimodal route planning; graph theory; navigation; intelligent transportation system (ITS)

### 1 问题背景与研究现状

在交通领域中, 所谓多制式路径规划指的是能够综合利用多种交通方式来寻找最优路径的方法。其中的“制式”是指交通方式, 例如步行、驾车、自行车、市内公交, 以及铁路、水路和空路等。如果不局限于交通领域, 那么一般而言, 制式可以看作是指网络的类型, 不同制式所对应的网络在拓扑结构和边代价函数等方面存在差异。随着综合交通运输与导航应用技术的发展, 应用领域对能够提供多制式路径规划功能服务的需求也日益迫切。

在现实生活中, 综合考虑多种交通方式实施路径规划是人们经常遇到的问题。以一个住在城市郊区并拥有私人汽车的家庭为例, 假设需要规划一条驾车从家出发到市内某个大型公园中的游乐场去的最快捷的路径, 如果考虑市内汽车交通拥堵的问题, 那么一种合理的规划方案可以是先开车到市区边界处, 然后换乘市内公交系统抵达公园附近, 最后再步行至游乐场。这就是一个多制式路径规划问题的典型案例。目前, 个人移动终端的计算能力日益增强, 定位功能逐渐成为了标准配置。而随着移动通信和

\* 收稿日期: 2009-06-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z208); 国家自然科学基金资助项目(40801160, 40601080)

作者简介: 吴京(1964—), 女, 副教授, 硕士。

无线网络技术的进步, 移动设备接入互联网会越来越稳定、高效和便宜。这些技术的发展使得针对个人用户的导航与路径引导功能逐渐普及。而对于在城市中可以随时改变交通方式的个人用户, 提供多制式的路径规划理应成为个人导航与路径引导服务中必不可少的一个部分。

如果将比例尺从城市交通应用缩小到城际、省际甚至国际交通运输的级别, 那么在这种尺度下多制式路径规划同样能够得到广泛的应用。以救灾抢险为例, 当发生重大自然灾害的时候, 往往需要实施对救灾抢险人员的大规模、长距离投送, 而在投送的过程中必然会考虑综合运用空运、铁路、陆路和水路等多种交通运输方式, 那么如何选择一条最优的组合路径、中间应该在哪里换乘就又是一个典型的多制式路径规划问题。

一个多制式路径规划问题主要包含两个子问题: 一是数据模型的建立, 二是路径规划算法的设计。考虑多制式路径规划问题的特点, 建立一个便于规划多制式最优路径的数据模型是解决问题的基础和关键。本文重点论述的就是对于多制式网络数据的建模方法。

目前, 在应用领域存在着大量成熟的单一制式路径规划系统与服务, 例如汽车导航系统, 城市公交信息系统, 以及包含路径规划功能的各种在线地图服务。这些系统和服务所提供的路径规划功能大都是在一种特定的网络上寻找最优路径。典型的例子是, 在 Google 地图的路径规划选项中, 用户只能选择一种交通方式, 即开车、步行或乘公交, 而无法提供如“先开车, 再走路, 然后乘公交, 最后再走路”的这种组合最优路径, 也就是多制式的路径规划功能。

针对多制式路径规划问题如何建立数据模型的研究在最近十年间开始逐渐活跃。2005 年, 来自 ESRI 的 Hoel 等介绍了他们构建多制式网络的方法<sup>[5]</sup>, 这种方法已经被应用在 ArcGIS 的网络分析工具箱中。2000 年, Southworth 和 Peterson 讨论了多制式货运网络的建模问题<sup>[2]</sup>。而在多制式路径规划算法的讨论中<sup>[1, 3-4, 6-11]</sup>, 也都会涉及模型建立的问题。这些关于多制式路径规划模型研究的文章大都来自交通领域, 这些研究人员提出了很多有效的方法来对静态的, 甚至是动态的交通网络进行建模并寻找最优路径。他们中的绝大部分都将不同制式的网络建成一个单一的模型, 这在一定程度上限制了不同制式间相互切换的灵活性。我们在对多制式路径规划的需求进行研究之后, 提出了制式切换点的概念, 并以此为基础提出了对多制式网络的建模方法。

## 2 制式切换点

在现代交通运输系统中, 除了基本的道路网络以外, 还存在许多用于连接不同交通方式的设施, 例如停车场、码头、机场等。这些设施使得人们能够容易地从一种交通方式转换到另一种。它们是沟通不同交通方式所对应的网络, 也就是不同制式网络的“关键点”。通过对现实生活中这类设施信息的采集和数字化, 并将其集成到导航数据库中, 就能够使导航数据库具有支持多制式路径规划的能力。

在对问题进行建模的过程中, 将这类设施抽象为一类特殊的点, 而只有在这种点上才能从一种制式切换到另外一种制式。因此, 称这类点为“制式切换点”, 或简称切换点(Switch Point, SP)。

### 2.1 切换点矩阵

一般地, 如果给定一个包含  $N$  种制式的集合,  $m_i$  和  $m_j$  是该集合中的两个不同元素, 那么只有满足某种“特定条件”的点才能够作为  $m_i$  与  $m_j$  之间的制式切换点。进一步, 这些“特定条件”可以通过一个  $N$  行  $N$  列的二维表来表达。称这个二维表为“制式切换点矩阵”, 或简称切换点矩阵(Switch Point Matrix, SPM, 如图 1。它是一个  $N \times N$  的矩阵, 其元素可以表达为  $\lambda_{SP}^{m_i m_j}$ , 或  $SPM(m_i, m_j) = \lambda_{SP}^{m_i m_j}$ 。  $\lambda_{SP}^{m_i m_j}$  表示从  $m_i$  切换到  $m_j$  需要满足的条件。此外, 当  $m_i = m_j$  时,  $\lambda_{SP}^{m_i m_j} = \text{NIL}$ 。即, 切换点矩阵的

$$\begin{matrix}
 & m_1 & m_2 & \dots & m_N \\
 \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_N \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccc}
 \text{NIL} & \lambda_{SP}^{m_1 m_2} & \dots & \lambda_{SP}^{m_1 m_N} \\
 \lambda_{SP}^{m_2 m_1} & \text{NIL} & \dots & \lambda_{SP}^{m_2 m_N} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \lambda_{SP}^{m_N m_1} & \lambda_{SP}^{m_N m_2} & \dots & \text{NIL}
 \end{array} \right]_{N \times N}
 \end{matrix}$$

图 1 切换点矩阵

Fig. 1 Switch point matrix

对角线上元素均为 NIL。这是因为从一种制式向它自己切换没有任何意义。以交通领域中的例子来说明  $\lambda_{SP}^{m_i m_j}$ : 如果  $m_i$  和  $m_j$  分别表示驾车和步行这两种交通方式, 那么  $\lambda_{SP}^{m_i m_j}$  则应为“该位置允许停车, 且可

机能够下车步行”。

通过引入切换点的概念以及切换点矩阵,可以基于图论给出一个顶点能够称为切换点,满足所需要的条件。对于给定的图  $G = \{V, E\}$ , 其中  $V$  表示顶点的集合,  $E$  表示边的集合, 那么  $\lambda_{SP}^{i,j}$  能够表达为可供  $V$  中的顶点去匹配的某些特殊属性。因此,有: 顶点  $v$  是制式  $m_i$  与制式  $m_j$  的切换点, 当且仅当  $v$  满足以下两个条件: (1)  $v$  能够同时在  $G_{m_i}$  和  $G_{m_j}$  被访问到; (2)  $\lambda(v) = \lambda_{SP}^{i,j}$ 。其中  $G_{m_i}$  和  $G_{m_j}$  分别表示制式  $m_i$  和  $m_j$  所对应的图;  $\lambda$  是一个关于顶点的函数, 能够取得顶点的属性值。对于满足上述条件的顶点, 我们用  $v_{SP}^{m_i, m_j}$  表示。通常, 制式  $m_i$  与  $m_j$  之间的  $v_{SP}^{m_i, m_j}$  是不唯一的。所有的  $v_{SP}^{m_i, m_j}$  构成一个制式  $m_i$  与  $m_j$  之间的切换点集合, 用  $V_{SP}^{m_i, m_j}$  表示, 并且大多数情况下  $|V_{SP}^{m_i, m_j}| > 1$ 。以城市交通网为例说明  $|V_{SP}^{m_i, m_j}|$  的不唯一性, 若  $m_i$  表示“驾车”而  $m_j$  表示“步行”, 那么城市中所有可用的停车场都可以作为  $m_i$  与  $m_j$  之间的切换点, 一般情况下一个城市中可用的停车场不会只有一个。

从概念上说, 制式切换点与文献[5]中多制式网络模型中能够同时存在于多个连通组(Connectivity Group)的点要素十分相似。然而在我们提出的基于切换点的网络模型中, 判断图中的一个顶点是否是切换点的依据就是这个顶点能否满足上文提到的两个条件。实际上, 在这两个条件下对切换点进行建模可以做到非常灵活。仍以城市交通网络为例, 一个能够沟通两种不同交通方式的切换点  $v_{SP}^{m_i, m_j}$ , 却可以对应于分属不同制式的网络中具有不同的地理位置的两个顶点。图2中示意了这种情况, 图中的“驾车一步行”切换点由机动车路网中和人行道路网中两个不同位置的顶点组成, 但由于它们具有相同的顶点ID, 因而能够被视为同一个切换点。

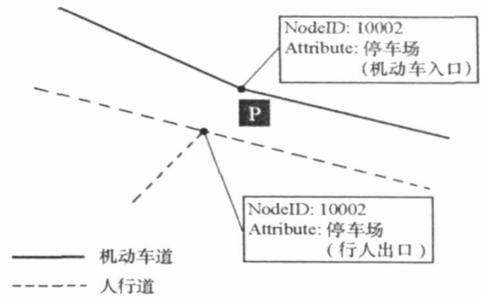


图2 两个地理位置不同的顶点组成的制式切换点

Fig. 2 The switch point is composed of two vertex with different locations

不难看出, 切换点对于解决多制式路径规划问题具有重要的意义。没有考虑切换点信息的路网数据集难以有效支持多制式路径规划应用。

## 2.2 交通切换点矩阵及其性质

针对交通领域的路径规划问题, 可以将任意两种不同的交通运输方式之间的切换点罗列到切换点矩阵中, 得到交通切换点矩阵(SPM in Transportation, SPM-T)。交通切换点矩阵是一般的切换点矩阵在特定领域内的一个实例。表1给出了以城市交通为应用背景的一个示例交通切换点矩阵, 在这个示例中并没有将所有可用的市内交通方式全部列出。这样, 对给定的交通方式有序二元组  $(m_i, m_j)$ , 就能够通过查阅交通切换点矩阵得到  $SPM-T(m_i, m_j)$  的值。

表1 交通切换点矩阵的一个示例

Tab.1 A sample SPM in transportation

	驾车	公交	步行
驾车	NIL	停车换车位(P+ R)	停车场
公交	有可用汽车的停车换车位(P+ R)	NIL	公交车站
步行	有可用汽车的停车场, 或汽车租赁处	公交车站	NIL

交通切换点矩阵具有两个性质:

(1) SPM-T 是非对称矩阵。仍然以“驾车一步行”这对组合来说明。如果用  $D$  表示驾车, 而用  $W$  表示步行, 那么  $SPM-T(D, W)$  与  $SPM-T(W, D)$  不相同。其原因在于: 当需要从驾车切换到步行方式的时候, 需要为驾驶员寻找一个可以停车的地方, 此时, “停车场”就是  $SPM-T(D, W)$  的值; 反之则情况不同, 如果要从步行方式转为驾车, 那么这意味着一定在某个位置有可用的汽车存在, 可能是之前停车的停车

场,也可能是汽车租赁商店,因而此时那个有可用汽车的地方就是SPM-T ( $W, D$  的值。通过观察不难发现,通常情况下  $SPM-T(m_i, m_j) \neq SPM-T(m_j, m_i)$ , 即,SPM-T 并不是对称矩阵。

(2 SPM-T 与观察尺度(地图比例尺 有关。表 1 中所罗列出的三种制式是在城市内交通这个尺度上的常用交通方式。如果把地图比例尺增大,也就是将观察的尺度推向更细致的层次,那么会发现其实在驾车与公交两种制式之间并不存在切换点,因为不可能像把自行车带到轻轨上一样把汽车直接开到公交车上,而在它们中间必然还应该有一个步行方式存在。另一方面,如果我们减小地图比例尺,将观察位置拉到较高的层次,达到城际、省际甚至是国际的尺度,那么此时一些交通制式如步行、自行车、市内公交等就应该被忽略掉,而需要考虑航空、铁路、公路和水路等制式了。因此,SPM-T 是随着观察尺度(地图比例尺 的变化而变化的。

### 3 多制式网络模型

基于第 2 节提出的制式切换点的概念,面向多制式路径规划应用,构建了多制式的网络模型,包含三个部分:(1 多制式图集合(Multimodal Graph Set, MMGS ;(2 MMGS 中顶点的属性表;(3 切换点矩阵(SPM )。

图是支撑路径规划算法的基础数据结构。多制式图集中所包含的是若干个不同的图,它们分别对应着不同的制式。切换点矩阵是判断图中的某个顶点是否能作为切换点的依据,从数据结构的角度看,切换点矩阵实际上是一个查找表。在判断切换点时,需要用顶点的属性去与切换点矩阵中的对应值进行比对,因此需要预先保存完备的顶点属性,而关系数据库中的表结构最适合用来存储这些属性。

在完备的顶点属性表与切换点矩阵的支撑下,原本在多制式图集中互不关联的各个图就能够在彼此之间的切换点位置进行制式变换,也就使得路径搜索算法能够从一个图进入另一个图。图 3 给出了多制式网络模型的示意图,它可以看作是一个通过切换点相互沟通的多层网络。

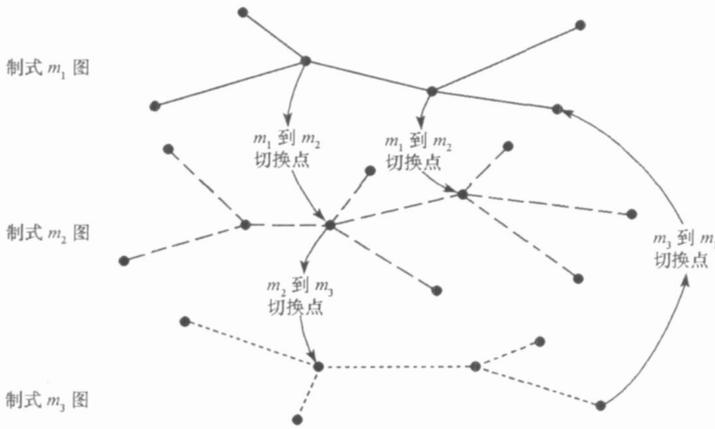


图 3 多制式网络模型

Fig.3 The multimodal network

### 4 多制式网络构建实验

基于免费的空间数据集 OpenStreetMap<sup>[12]</sup> 进行了多制式网络的构建实验。由于 OpenStreetMap 在我国境内的数据非常粗糙,而欧洲部分的数据又非常详细,所以选取德国慕尼黑市区的部分数据进行了测试。测试数据集如表 2 所示。实验的硬件环境为一台配有 Intel Core2 Duo 2.2GHz CPU 和 2GB 内存的 PC,软件环境为 Windows XP Professional SP3 操作系统,采用 C# 语言,基于微软 .net 框架 3.5 实现了构建多制式网络的实验程序。读取测试数据集和构建网络所需的时间如表 3 所示,得到包含 4 种制式的图集合的基本信息在表 4 中列出,四种制式对应的切换点矩阵也是一种交通切换点矩阵,由表 5 表示。

表2 测试数据集

Tab.2 Experimental data set

数据源	数据格式	数据文件大小 (单位: MB)	数据获取时间	地理范围 (单位: °)	覆盖区域 (单位: km)
OpenStreetMap	XML	5.46	2009- 2- 13	北纬:48.1717~ 48.1266 东经:11.5384~ 11.6011	东西:4.970 南北:4.663

表3 数据模型构建所需时间

Tab.3 Time to build data model

原始数据读取 (单位: s)	多制式网络构建 (单位: s)	合计 (单位: s)
0.3438	2.094	2.438

表4 多制式图集合

Tab.4 Multimodal graph data set

制式	顶点数	边数	边数/顶点数
机动车	4807	9125	1.90
人行	9077	22482	2.48
自行车	5798	11186	1.93
马车	3142	5811	1.85

表5 切换点矩阵

Tab.5 Switch point matrix

	机动车	人行	自行车	马车
机动车	NIL	可停车的位置	有可用自行车的可停车位置	有可用马车的可停车位置
人行	有可用汽车的位置	NIL	有可用自行车的位置	有可用马车的位置
自行车	有可用汽车的自行车存放处	自行车存放处	NIL	有可用马车的自行车存放处
马车	有可用汽车的马车停靠点	马车停靠点	有可用自行车的马车停靠点	NIL

## 5 总结与展望

本文面向步行者导航、多制式导航、综合交通运输等多制式路径规划应用,针对多制式网络的建模这个基础性的问题进行了探讨。首先提出了制式切换点的概念。制式切换点作为沟通不同制式所对应的图的桥梁,对于在多制式图集合上实施路径搜索具有重要的意义,因此,也成为所提建模方法的核心概念。切换点可以用矩阵的形式来表达,而我们对矩阵中元素高度抽象的定义使得切换点矩阵可以被广泛应用。交通切换点矩阵是切换点矩阵在交通领域的一个具体实例,它具有非对称和尺度相关两个性质。在制式切换点概念的支撑下,建立了由多制式图集合、顶点属性表和切换点矩阵三部分组成的多制式网络模型。这三部分都可以用经典的数据结构来表达。最后,我们在真实的城市道路数据集上进行了多制式网络的构建实验。

下一步,将针对两个问题进行更加深入研究。第一是将以独立兴趣点(POI形式存在的制式切换点与交通运输网络无缝集成;第二就是基于本文提出的多制式网络模型进行多制式路径规划算法的研究。

## 参考文献:

- [1] Boardman B S, Malstrom E M, Butler D P, et al. Computer Assisted Routing of Intermodal Shipments [J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33: 311- 314.
- [2] Southworth F, Peterson B E. Intermodal and International Freight Network Modeling [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2000, 8: 147- 166.
- [3] Ziliaskopoulos A, Wardell W. An Intermodal Optimum Path Algorithm for Multimodal Networks with Dynamic arc Travel Times and Switching Delays [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 125: 486- 502.
- [4] Boussetra M, Bloch C, Moudni A E. An Exact Method to Find the Intermodal Shortest Path (ISP [C]//Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference, 2004, 2: 1075- 1080.
- [5] Hoel E G, Heng W L, Honeycutt D. High Performance Multimodal Networks [C]//Advances in Spatial and Temporal Databases. Springer Berlin/Heidelberg, 2005, 3633: 308- 327.
- [6] Bielli M, Boulmakoul A, Mounif H. Object Modeling and Path Computation for Multimodal Travel Systems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175: 1705- 1730.
- [7] Hochmair H H. Grouping of Optimized Pedestrian Routes for Multimodal Route Planning: A Comparison of Two Cities [C]//The European Information Society, L. Bernard, A. Friis christensen, and H. Pundt, Eds. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 339- 358.
- [8] Zografos K G, Androustopoulos K N. Algorithms for Itinerary Planning in Multimodal Transportation Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008.
- [9] 张得志,凌春雨.多种运输方式的组合优化模型及求解算法 [J].长沙铁道学院学报,2002,20(4).
- [10] 陈相东,刘彦良,王鹏涛,等.多种运输方式模型优化及求解 [J].天津师范大学学报,2005,25(3):66-69.
- [11] 张运河,林柏梁,梁栋,等.优化多式联运问题的一种广义最短路径方法研究 [J].铁道学报,2006,28(4):22-26.
- [12] Coast S. OpenStreetMap Project [EB]. <http://www.openstreetmap.org>, 2004.