

一种顾及步行引导的多标准路径规划方法

于海聰 陆 锋

(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 以独立图层表达各种交通模式是交通系统空间数据表达的主要形式。虽然这种数据建模方式完全满足可视化和数据管理需求,然而各种交通模式的分图层独立表达使得交通模式之间的连接关系构建成为瓶颈问题,直接导致有着最为迫切需求的多标准出行路径规划难以实现。首先提出了一种多模式交通网络逻辑一体化模型,及其自驾车、公交、步行等交通模式无缝转换的技术流程,在此基础上,发展了一种顾及步行模式的多标准出行路径规划方法,实现了用户透明的自动化交通模式组合,为出行者提供满足个性化需求的、多标准的出行信息服务。

关键词 路径规划 多模式 多标准 步行导航

中图法分类号: P208 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)04-677-07

A Multi-criteria Route Planning Approach Considering Walking Guidance

YU Haicong, LU Feng

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract Representing the different transportation modes with independent map layers has been widely adopted in GIS for transportation related applications. Such a data model can surely meet the requirements of visualization and data management, but the independent map layers representation makes it rather difficult to generate the inherent connectivity relationships between the transportation modes, and consequently results in the multi-criteria route planning difficult to be implemented. In this paper, a logically integrated multi-modal transportation network model is firstly presented, and a technical flow for seamless transfer among transportation modes such as private driving, bus, subway, walking etc. Then a multi-criteria route planning approach considering accurate walking guidance is proposed, in which a transparent combination of transportation modes in multi-criteria route planning is realized. It is argued that the proposed approach can provide practical, feasible and personalized travel information services.

Keywords route choice, multi-modal, multi-criteria, walking guidance

0 引 言

城市交通运输网络涵盖公共汽车、地铁、轻轨等公共交通模式以及出租车、自驾车、自行车、步行等个体交通模式。公众出行过程具有出行模式多样化和出行路线个性化的特点。随着社会经济的快速发

展,城市出行需求急剧增长,涉及多种交通模式的多标准路径规划作为一种空间决策支持工具而出现,为公众提供出行信息服务。然而,目前的个体导航系统、出行信息平台 and 地图网站在出行路径规划方面普遍存在以下问题:

1) 路径规划模式单一。只能提供静态交通环境下的公交/地铁换乘或自驾车路径规划方案,路径规

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z241);国家自然科学基金项目(40871184);资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新团队计划项目(088RA400SA)

收稿日期:2010-01-14; **改回日期:**2010-01-22

第一作者简介:于海聰(1984—),男。中国科学院地理科学与资源研究所地图学与地理信息系统专业博士研究生。主要研究方向为交通地理信息系统,出行信息服务,多模式路径规划。E-mail: yuhc@lreis.ac.cn

划只能在独立的单一模式上进行(将具有显著差异的公交和地铁模式混合为同一模式),无法获取满足用户特定出行标准的、可能涉及多种交通模式的路径规划结果。

2) 路径规划结果缺乏必要的步行引导过程。步行引导过程或者通过标出目的地方位和直线距离、或按照底层路网(车行道)给出不合理的步行路径,没有考虑人行天桥、地下通道、过街通道等步行设施,使得步行引导结果无法按图索骥,或与出行体验不符,缺乏可行性,无法提供无障碍的“门到门”出行服务。

3) 路径规划结果评价标准单一或缺乏现实意义。静态环境下的距离最短和换乘最少是最常见的两个路径规划评价标准。前者不能体现出行者的直接需求;后者在缺乏有效步行引导的情况下缺乏实用性。对于实际出行最关心的出行时间标准,由于涉及动态变化的路况信息及其精确的步行换乘过程时间耗费,难以在路径规划过程中得到合理考虑。

产生上述问题的原因在于,以“图层”方式表达各种交通模式的几何信息和语义信息,使得各模式特征实体之间相互独立,关系割裂,路径搜索仅能在一个独立的交通模式图层上进行,无法考虑交通模式间的无缝连接过程;动态变化的路况信息必然对自驾车、公交等交通模式下的出行过程产生影响,但目前的公交独立图层建模方式无法继承下承路网动态变化信息,至多只能在自驾车模式下考虑动态路况影响下的路径规划过程。

由于缺少有效的多模式交通网络要素关系处理技术和多标准路径搜索算法,导致目前商用系统提供的路径规划服务无法实现多种模式的自由结合,也不能提供交通模式转换时精确的步行引导过程,难以实现真正的多模式、多标准路径规划服务。

多标准路径规划的目的是为出行者提供满足个性化需求的出行方案。目前,业界关于多标准(或多目标、多属性)出行路径规划问题的研究主要体现在两个方面:一是多标准选择问题,即选择哪些标准作为评价标准集,涉及出行评价标准的确定和标准集中标准数量优化,前者常伴随有实验调查^[1],后者通过一定方法合并相关性较大的标准以减少标准的数量^[2-5];二是如何利用这些标准获得优化路径问题^[6-7]。另外,大批学者从数学角度进行了研究^[8-11]。虽然这些研究大多停留在单模式下,但是对于解决多模式环境下的多标准路径规划问题有一

定的借鉴价值。

为了解决以上问题,首先提出了一种多模式交通网络逻辑一体化模型,及其自驾车、公交、步行等交通模式无缝转换的技术流程,在此基础上,发展了一种顾及步行模式的多标准出行路径规划方法,实现了用户透明的自动化交通模式组合,为出行者提供满足个性化需求的多标准出行信息服务。

1 多模式交通网络逻辑一体化模型

为了解决目前多模式数据模式间的连接问题,以服务于多标准路径规划,提出一种多模式交通网络逻辑一体化模型。在对多模式网络结构的描述中,多重图^[12-14]、网格^[15]、一体化独立网络^[16-17]、子图^[18-20]是较为常见的网络结构。采用子图概念表达模式间关系,每一种模式表示为一个层(子图),采用转换节点(transfer note)和转换边(transfer link)的方法建立模式间的连接,可以充分利用现有的交通网络数据^[3-4,14,18-23]。转换节点是分属于不同层的具有相同空间位置信息的节点,转换边是在不同模式或同一模式不同节点间,表达连接属性的边。

对于模式间拓扑关系的自动化构造,在单模式交通逻辑网络的基础上,采用虚连接法自动化建立多种交通模式之间的拓扑关系,并实时响应路网的动态信息,保证多模式交通逻辑网络间连通关系的实时性。

该多模式逻辑网络在物理上分散,逻辑上统一,物理存储的只是各种模式的逻辑网络连通信息,而在逻辑上统一多模式交通逻辑网络的整体关系。采用这种形式能减少物理上构建多模式逻辑网络与单模式网络库之间所产生的数据冗余,易于数据一致性的维护。而且该逻辑网络根据具体的需求动态产生,可以有效地避免未涉及的交通模式参与整个网络连通关系构造,减少不必要的资源消耗。

模型共定义了4类交通网络:自驾车道路网络、公交网络、轨道交通网络和步行/自行车网络,如图1所示。步行/自行车网络除了车行道、节点实体之外,还存在专为行人/自行车模式设置的过街设施,如地下通道、人行天桥等。

其中,道路网具有独立的几何分布特征,采用导航数据模型表达。公交网络包含不同的公交线路,是依附于道路网络的逻辑网络,基于动态分段技术构建。公交车站承载模式内和模式间的转换。地铁网

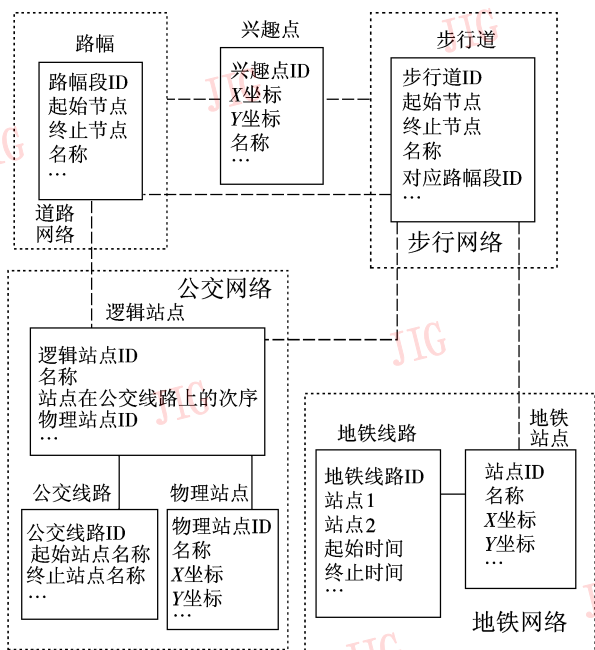


图 1 多模式交通网络及模式间关系

Fig. 1 Multi-modal network and relationships

络以带有时间表属性的无向图表示,具有独立的几何分布特征。与个体交通模式的连接发生在地铁站点或附近的兴趣点(POI),通过步行模式进行连接。

行人路径的选择不仅考虑距离还考虑人行道和过街人行设施等^[24]。步行模式在以往的研究中很少被当做一种独立的模式看待,主要通过添加虚拟步行边^[14]和基于道路网临时提取人行道作为步行路径^[13]。但是,前者提供的路径不能用于精确的步行引导;后者没有考虑步行网络与底层车载导航路网之间可能存在的差异,往往得到不实际的步行路径,直接导致出行服务无法提供详尽的无缝导航。步行模式网络在多模式网络模型中至关重要,它提供了进入其他模式的通道,填补了模式转换间的空隙,将多种模式进行无缝连接。本文基于道路网和诸如人行道、过街天桥、地下通道、过街人行道等步行设施数据,结合空间分析和语义分析方法,自动构建了步行网络,以无向图表示。步行网络的转换节点定义为任意点状地物要素,如公交站点、地铁站点、POI 等等。

POI 被定义为路径起止点和转换节点,它可以方便地依附到各种模式的网络中。该模型中,各种交通模式数据在物理上相互独立性,为数据管理和数据更新提供便利;同时,逻辑上进行无缝连接,容易实现拓扑重建,实现了独立性与连通性的统一。

2 多模式多标准路径规划方法

2.1 多模式多标准路径规划问题描述

在单模式环境中,路网模型通常描述为有向图 $G = (V, E)$, 其中 $V = \{1, \dots, n\}$ 表示节点 n 的集合, E 表示有向弧的集合, 每条弧由一对连接节点 i 和 j 的边 $e = (i, j)$ 组成, 边的权重由 $w(e)$ 表示。两个不同节点 $(s \in V, t \in V)$ 之间的一条路径 $R(s, t)$ 定义为节点和边的交替序列 $R(s, t) = \{s = i_1, (i_1, i_2), i_2, \dots, i_{j-1}, (i_{j-1}, i_j), i_j = t\}$, 路径长度由沿路径 $R(s, t)$ 的边的权重之和表示。因此, 最短路径问题即转化为求 $\sum w(e_{i,j}), e_{i,j} \in R(s, t)$ 的最小值问题。

多模式环境下, 图 G 可以看做是多个子图的统一, 每个子图代表一种出行模式。因此, 在一个涉及 3 种出行模式的网络中, $G = G_D \cup G_P \cup G_W$, 并有 $G_D = (V_D, E_D), G_P = (V_P, E_P), G_W = (V_W, E_W)$ 分别表示个体交通模式如自驾车, 公共交通模式如公共汽车、地铁、有轨电车等, 以及步行模式。子图节点 V_D, V_P, V_W 分别定义在相应的模式中, 并有 $V_{D \cap W} = V_D \cap V_W \neq \emptyset$ 和 $V_{P \cap W} = V_P \cap V_W \neq \emptyset$, 描述不同交通模式间的连接。类似地, $E_{D \cap W}, E_{W \cap P}$ 定义了驾车模式和步行模式的转换; $E_{P \cap W}, E_{W \cap P}$ 表示公共交通模式与步行模式的转换; 驾车模式与公共交通模式的转换通常借助步行模式实现。

在多标准环境下, 边的权重 $w(e)$ 表示为一个 p 维向量 $C(e) = (C_1(e), C_2(e), \dots, C_p(e)), e \in R(s, t)$, 每一维度代表一种标准。对于给定路径 $R(s, t)$ 的任一维度 $k \in (1, \dots, p)$ 权重值表示为 $C_k^{R(s,t)} = \sum_{e \in R(s,t)} C_k^e$ 。因此, 多标准优化问题即可表示为求 $\min C^{R(s,t)}$ 。特别地, 当 $p = 1, C(e)$ 代表边的长度时, 该问题即为最短路径问题。通过这种维度表示方法, 时间最短、换乘最少、费用最低等标准可以分别进行表示, 亦可合并形成多标准优化问题。

2.2 维度值计算模型

单一的出行标准已无法满足目前出行者日益多样化的出行需求。权衡多种出行标准的优化路径选择问题逐渐成为一种研究趋势。众多研究人员针对采用不同交通工具的出行者进行了路径选择标准研究^[1,5]。研究发现, 距离标准(最短)、时间标准(最快)、费用标准(最经济)和换乘标准被出行者普遍采用。因此, 前面提到的标准集可以表示为

$C = (C_1, C_t, C_f, C_r)$, 其中 C_1, C_t, C_f 和 C_r 分别表示距离、时间、费用和换乘标准。

1) 距离维度模型 在最短路径标准下, 距离维的计算通过各种模式下的路径长度分别计算后统一表达, 模式内及模式间转换耗费的路径长度等也包含在该模型中。

2) 时间维度模型 包含边耗费和节点耗费两个方面。步行模式中, 时间耗费包含步行距离耗费、交叉口等待耗费、过街延迟耗费等; 公交模式中, 行驶速度通过实时交通信息处理平台获得, 同时考虑了公交车进出站、道路转弯耗费、公交发车间隔等; 地铁模式中时间耗费主要依据时间表属性, 同时考虑地铁线路换乘耗时; 驾车模式与步行模式类似, 但行车速度根据实时交通路况动态变化。模式内转换时间耗费计入各自模式中; 模式间转换通常借助步行模式, 因此时间耗费计入步行模式中。

3) 费用维度模型 出租车费用由出行距离和等待(低速行驶)时间决定; 公交费用由公交线路和起止站点距离决定; 地铁换乘为统一票价(依城市不同计费方式有差异)。针对以上模式分别建立了相应的计算模型。

4) 换乘维度模型 包含模式内换乘和模式间转换。公交换乘作为模式内换乘记录换乘数; 而地铁换乘, 由于计费方式和换线耗费已考虑, 因此不再记录模式内换乘数, 与计费方式相统一。

2.3 路径规划策略

基于多模式路网数据模型, 提出了一种基于策略的路径搜索算法。基本步骤如下: 首先根据用户指定的出行路径标准, 进行模式透明的优先级(权重)分配, 不同模式网络的优先级允许相同; 然后依据高优先级扩展搜索、低优先级模式连接的原则进行路径搜索; 最后对多条路径结果进行对比, 选出最符合用户出行需求的路径搜索结果, 反馈给用户。路径搜索的基本思想是首先在高优先级模式网络上进行路径规划, 此时路径段可能只是完整路径中的一部分, 然后, 对其他部分在次级模式网络上进行搜索; 重复此过程直至完成整条路径。算法流程如图 2 所示。

图 3 为根据该算法得到的多模式路径搜索结果示意图, 在各模式搜索过程中通过比较权重向量实现路径选择。在各种标准下, 模式优先级被预先定义, 用户指定的个人出行模式喜好可对该默认值进行修改, 以满足用户个性化实际出行需求。该方法实现了模式无关的透明模式组合, 由优先权决定的

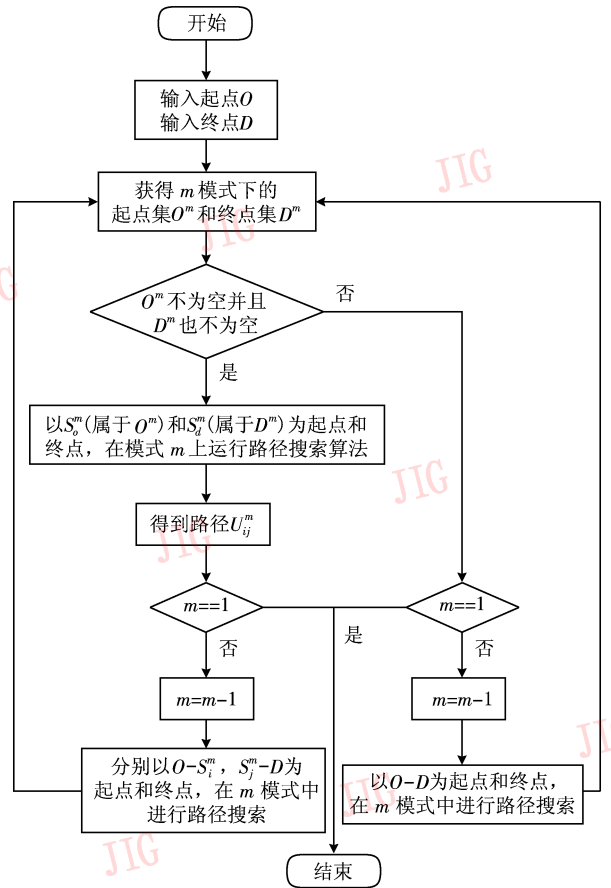


图 2 多标准路径规划算法流程

Fig. 2 Flow chart of multi-criteria route planning algorithm

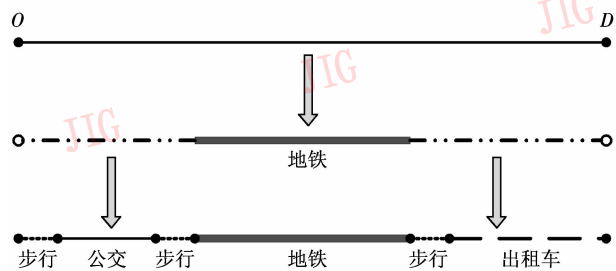


图 3 多模式路径搜索结果示意图

Fig. 3 Example of multi-modal route planning

搜索顺序结合出行者个人喜好, 能够得到多样化的出行方案结果。通过该方法得到的结果并非唯一解, 而是满足用户出行需求的一组优化解, 因此, 能够提供可替换的出行方案。

3 实例研究

在城市交通系统中, 步行模式将轨道交通和公

交系统进行衔接,使交通系统更趋向一体化^[23]。在本文提出的多模式网络模型的基础上,以北京市交通网络为实验对象,建立了原型系统,如图 4 所示。

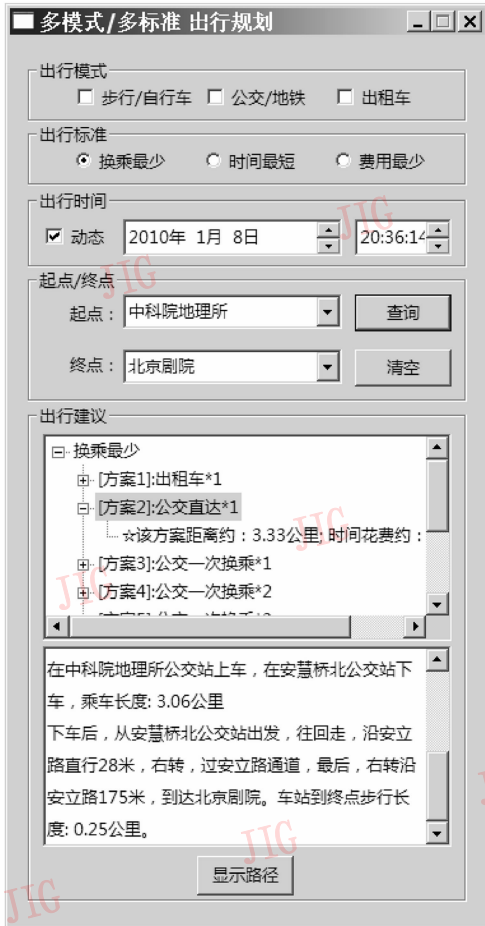


图 4 原型系统用户界面

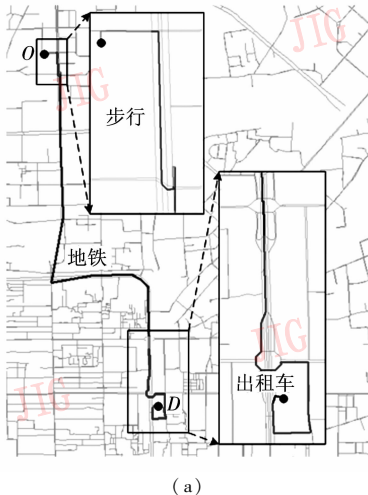
Fig. 4 User interface of pilot system

用户需求通过指定或省略出行标准或出行模式来实现,从图 4 显示的推荐方案集中可以看出,通过该方法可以获得包含精确步行导航的出行规划方案,结合自然语言输出的文字描述,能够为出行者提供“门到门”的无障碍、无缝全程路径规划服务。

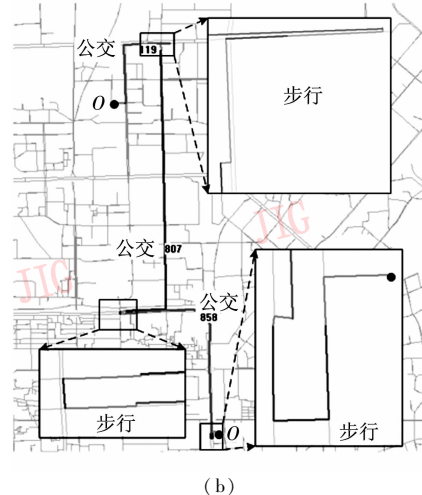
图 5 显示了采用本文提出的优先级扩展策略结合 Dijkstra 算法,进行多模式环境下多标准动态路径规划的结果。在不指定具体模式的前提下,图 5 (a)显示了动态环境下时间最短标准的推荐路径,图 5(b)显示了换乘最少标准下的路径结果,从放大的细节部分可以看出,整个出行方案实现了用户透明的多模式组合方式和模式间的无缝衔接。

在动态环境下,网络状态随时间动态变化是多模式网络的一个主要特点^[25],并因此而影响模式间的转换方式。目前出行信息服务应用中的路径规划多采用静态算法并考虑当前时刻路段权值的方式,没有考虑车辆进入路段时刻的实际路阻,没有考虑利用可获得的实时交通信息进行动态路径规划。因此,出行路径规划结果很难符合用户的出行体验。本研究在充分考虑动态交通变化的特点基础上,充分利用了历史交通数据推理和实时交通预测,作为动态环境下路径规划的依据。

在时间最短标准下,图 6 显示了不同出行方案在考虑实时交通信息时的规划结果。对于相同的 O-D 和相同的出发时间(07:20),图 6(a)出行方案耗时 35 min,涉及多种交通模式,并且花费适中;图 6(b)为出租车模式结合步行引导的出行方案,耗时 47 min,但花费较多;图 6(c)为公交换乘方案,耗



(a)



(b)

图 5 用户透明的多模式路径组合

Fig. 5 Mode transparent route planning

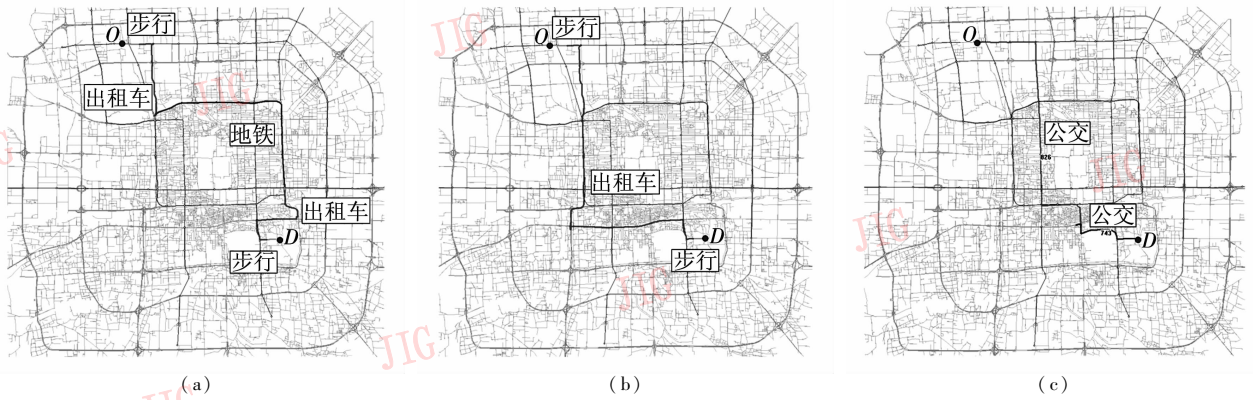


图 6 实时路径规划

Fig. 6 Real-time route planning

时 104 min, 但花费最少。可以看出, 本文所采用的路径规划方法能够更好地适应实时环境, 提供多标准的模式透明的组合方案, 更符合用户的出行体验。

为了验证该方法的效率, 笔者在实验区 4 个对角线区域分别选取 4 个矩形区域作为样本选择区, 在每个对角选择区随机选择样本点, 作为 $O-D$ 点对, 在动态环境下分别运行多模式环境下的出行时间最短标准和换乘最少标准算法。测试环境为 Intel Pentium Dual CPU E2160 1.79 GHz, 2 GB 内存, Windows XP Professional SP3 操作系统。在时间最短标准下, 算法平均耗时 0.017 s; 在换乘最少标准下, 算法平均耗时 0.034 s。

4 结 论

本文提出了一种顾及步行模式导航的多模式、多标准、动态路径规划方法。通过研究道路网络、公交、地铁、步行模式的特点, 分别提出了几何建模方式, 并设计了模式透明的逻辑一体化无缝出行网络, 采用多维权值向量表示多种评价标准, 涉及距离最短、时间最短、换乘最少和费用最低等, 实现了模式透明的多标准出行路径规划过程, 为出行者提供满足个性化需求的、优化可替换的、无缝全程无障碍出行服务。实验结果显示本文所提出的方法能够满足用户对出行路径查询的效率和可用性需求, 使得路径查询结果更符合实际的出行体验。

参考文献 (References)

[1] Golledge R G. Path Selection and Route Preference in Human

Navigation: A Progress Report [M]//Frank A U, Kuhn W. Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS. Berlin: Springer-Verlag, 1995, 207-222.

[2] Hochmair H H. Dynamic route selection in route planners[J]. Kartographische Nachrichten, 2007, 57(2): 70-78.

[3] Hochmair H H. Effective user interface design in route planners for cyclists and public transportation users: an empirical analysis of route selection criteria [C/CD]//Transportation Research Board-87th Annual Meeting. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2008.

[4] Hochmair H H. Grouping of Optimized Pedestrian Routes for Multi-modal Route Planning: A Comparison of Two Cities [M]//Bernard L, Pundt H, Friis-Christensen A. The European Information Society-Taking Geoinformation Science One Step Further. Berlin: Springer-Verlag, 2008; 339-358.

[5] Hochmair H H. Towards a Classification of Route Selection Criteria for Route Planning Tools [M]//Fisher P F. Developments in Spatial Data Handling. Berlin: Springer, 2004; 481-492.

[6] Malczewski J. Gis-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(7): 703-726.

[7] Mooney P, Winstanley A. An evolutionary algorithm for multicriteria path optimization problems [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(4): 401-423.

[8] Skriver A. A classification of bicriterion shortest path (BSP) algorithms [J]. Asia Pacific Journal of Operational Research, 2000, 17(2): 199-212.

[9] Ulungu E L, Teghem J. Multi-objective shortest path problem: a survey [C]//Glückaufova D, Loula D. Proceedings of the International Workshop on Multicriteria Decision Making: Methods-Algorithms-Applications, Liblice: Czechoslovakia, 1991: 176-188.

[10] Rasmussen L M. Zero-one programming with multiple criteria [J]. European Journal of Operational Research, 1986, 26(1): 83-95.

[11] Zionts S. A survey of multiple criteria integer programming methods [J]. Annals of Discrete Mathematics, 1979, (5): 389-

- 398.
- [12] Bielli M, Boulmakoul A, Mouncif H. Object modeling and path computation for multimodal travel systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175(3): 1705-1730.
- [13] Booth J, Sistla P, Wolfson O, et al. A data model for trip planning in multimodal transportation systems[C]//*Proceedings of the 12th International Conference on Extending Database Technology: Advances in Database Technology*, Saint Petersburg, Russia, New York: ACM Press, 2009: 994-1005.
- [14] Foo H M, Lao Y, Leong H W, et al. A multi-criteria, multimodal passenger route advisory system[EB/OL]. [2010-01-08]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.41.9679&rep=rep1&type=pdf>.
- [15] Fragouli M, Delis A. Easytransport: an effective navigation and transportation guide for wide geographic areas[C]//*Proceedings of 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI '02)*, Washington, DC, Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society, 2002.
- [16] McCormack J E, Roberts S A. Exploiting object oriented methods for multi-modal trip planning systems[J]. *Information and Software Technology*, 1996, 38(6): 409-417.
- [17] Wu Xincan, Yang Lin, Zhou Shunping, et al. Multimodal supported composite transportation network model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(4): 341-346. [吴信才, 杨林, 周顺平, 等. 支持多模式的复合交通网络模型研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(4): 341-346.]
- [18] Ayed H, Khadraoui D, Habbas Z, et al. Transfer graph approach for multimodal transport problems[M]//Thi H A L, Bouvry P, Dinh T P. *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 538-547.
- [19] Carlier K, Fiorenzo-Catalano S, Lindveld C, et al. A supernetwork approach towards multimodal travel modeling [C/CD]. 82nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2003.
- [20] Miller H J, Storm J D. Geographic information system design for network equilibrium-based travel demand models [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996, 4(6): 373-389.
- [21] Chiu D, Lee O, Leung H, et al. A multi-modal agent based mobile route advisory system for public transport network [C]//*Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-38)-Track 3*. Big Island, HI, USA: IEEE Computer Society, 2005.
- [22] Lo H K, Yip C W, Mak B. Passenger route guidance system for multi-modal transit networks [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2005, 39(3): 271-288.
- [23] Zhou C, Lu F, Wan Q. A conceptual model for a feature-based virtual network[J]. *GeoInformatica*, 2000, 4(3): 271-286.
- [24] Muraleetharan T, Hagiwara T. Overall level of service of urban walking environment and its influence on pedestrian route choice behavior: analysis of pedestrian travel in Sapporo, Japan [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, Volume 2002/2007: 7-17.
- [25] 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(3): 486-502.