

# 基于转向限制和延误的双向启发式最短路径算法

郑年波<sup>1, 2</sup> 李清泉<sup>1, 2</sup> 徐敬海<sup>2</sup> 宋 莺<sup>1</sup>

(1 武汉大学空间信息与网络通信技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)  
(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘 要:**提出了基于节点的交通网络拓扑关系模型,描述交通网络的物理连通性以及逻辑连通性;根据对偶图的思想,定义搜索节点结构,处理交叉口转向限制和延误;改进传统的 Dijkstra 算法,提出了基于搜索节点的双向启发式 A\* 算法,使用二叉堆优先级队列存储扩展节点, RB-tree 存储标记节点。实验表明,本算法在效率和结果两方面都能满足车辆导航系统路径规划的要求。

**关键词:**车辆导航系统;路径规划;最短路径算法;交通网络;转向限制和延误

**中图法分类号:**P208

近年来,随着汽车电子产业的迅猛发展,作为汽车选配件的车辆导航系统(vehicle navigation system, VNS)越来越受汽车厂商和驾驶员的青睐。路径规划是 VNS 的核心模块,其本质是最短路径问题。在最短路径算法研究中,标号算法是主流<sup>[1-4]</sup>,基于空间层次推理的分层算法<sup>[5-7]</sup>用来求解大规模网络路径搜索问题。

在实际交通行为中,由于转向限制的存在,地理意义上连通的道路在实际交通行为中可能不可通达。此外,由于交叉口的转向限制引起的时间延误可以达到全部行驶时间的 17%~35%<sup>[8]</sup>。增设虚拟边法和对偶图法可以用来解决此类问题<sup>[9]</sup>,其中对偶图法相对于增设虚拟边法效率更

高。另外一种解决方法——边标号法<sup>[10]</sup>和对偶图法本质上是一样的。

## 1 交通网络拓扑关系模型

交通网络拓扑关系可以抽象为物理连通性和逻辑连通性两个层次。物理连通性是指节点和路段之间的空间链接关系;而逻辑连通性指的是交通行为上的可达性,即交通关系,使用转向表法<sup>[12]</sup>来描述。考虑到转向限制和延误发生在道路交叉口,定义基于节点的交通网络拓扑关系模型,见图 1。

模型中,节点处的拓扑关系由实体拓扑链接

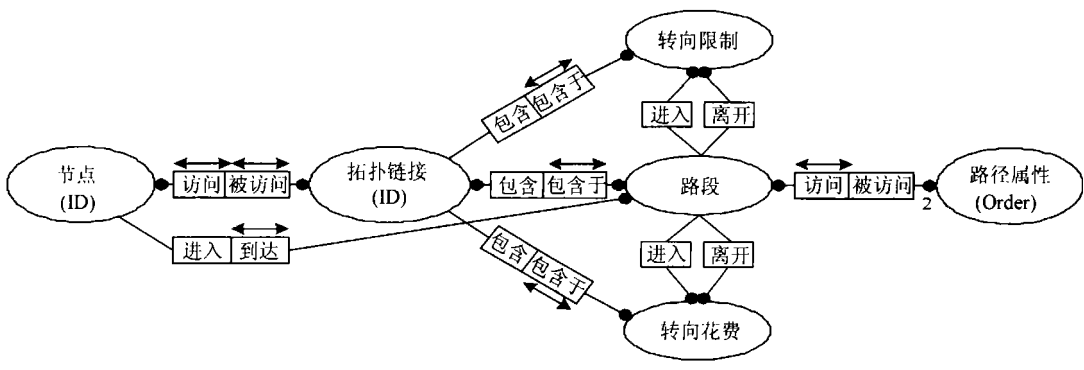


图 1 ORM 图表示的交通网络拓扑关系模型

Fig. 1 Topology Relationship Model of Transport Network with ORM

来表达。在拓扑链接中记录了三类信息:关联的路段、转向限制、转向花费。其中,关联的路段反映了物理连通性,转向限制和转向花费反映了逻辑连通性。拓扑链接与节点一一对应,通过节点 ID 来访问。

路段的拓扑关系和属性分开表达,实体路段存放拓扑关系,实体路段属性存放路段的属性。此模型以节点为基准,节点惟一存在,同一路段将会被分离为方向相反的两条路段。这样,将会有两个路段实体对应于一个路段属性实体。另外,在路段实体中记录了邻接节点 ID,通过此 ID,拓扑检索得以延伸下去。

2 双向启发式最短路径算法

2.1 搜索节点

使用对偶图来表达交通网络如图 2 所示。图中,DNODE 表示对偶节点,DLINK 表示对偶边。根据对偶图思想<sup>[11]</sup>,DNODE=LINK,DLINK 表示 NODE 处的转向行为,包括转向限制和延误。

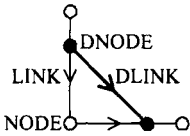


图 2 交通网络的对偶图表示法

Fig. 2 Dual Graph Representation of Transport Network

定义搜索节点结构  $SNODE = (DNODE, NODE)$ ,其中,DNODE 用于实现对偶图功能,而引入 NODE 则是为了进行下一步拓扑检索。由于  $DNODE = LINK$ ,有  $SNODE = (LINK, NODE)$ 。另外,为了回溯获取最短路径的需要,可以扩展搜索节点结构,增加指向上一搜索节点的指针,则  $SNODE = (LINK, NODE, Previous SNODE)$ 。

2.2 启发式 A\* 算法

将人工智能中 A\* 算法用于路径规划,关键在于启发式函数  $h(n)$  的选取。当前点到终点 D 的欧式距离可以作为启发式函数,考虑到计算的复杂性,令  $h(n) = |x_n - x_0| + |y_n - y_0|$ 。

使用前面讨论的拓扑关系模型表示交通网络,使用二叉堆优先级队列来实现 OPEN 集合,使用 RB-tree 来实现 CLOSE 集合,算法的基本流程见文献<sup>[13]</sup>。但是与之相比,本算法不需要修改从起点到当前扩展节点的距离值。这样,OPEN 表中可能存放同一节点多次,其距离值不

一样。这样标记节点的过程就变为:① 从 OPEN 集合中选取代价函数  $f(i)$  最小的节点  $i$ ;② 判断  $i$  是否在 CLOSE 集合中,如果在,略过并转向①;否则③标记  $i$ ,即将其放入 CLOSE 集合。

2.3 双向启发式 A\* 算法

双向搜索就是同时从起点正向搜索和从终点逆向搜索,其关键在于终止条件和切换条件的设定。设  $s$  为起始节点, $d$  为终止节点; $F$  为正向搜索 CLOSE 集合, $G$  为逆向搜索 CLOSE 集合; $W$  为正向 OPEN 集合, $V$  为逆向 OPEN 集合。则搜索终止条件为:① 正向搜索到终点,即  $d \in F$ ;或②逆向搜索到起点,即  $s \in G$ ;或③双向搜索汇合;或④正向和逆向节点都扩展完,搜索失败,即  $W = V = \emptyset$ 。搜索切换条件为:始终选择 OPEN 集合元素较少的一方进行搜索,每次搜索一步。

设  $|W|$ 、 $|V|$  表示集合  $W$ 、 $V$  的元素个数,双向启发式 A\* 算法流程如下。

- 1) 初始化,将起点  $s$  放入  $W$ ,将终点  $d$  放入  $V$ 。
- 2) 判断  $W$  和  $V$  是否为空。如果  $W = \emptyset$ ,正向搜索终止,转入单向的逆向搜索;如果  $V = \emptyset$ ,逆向搜索结束,转入单向的正向搜索;若  $W = V = \emptyset$ ,搜索失败。
- 3) 比较  $|W|$  和  $|V|$ 。如果  $|W| \leq |V|$ ,正向搜索一步:
  - a) 从  $W$  中取出代价函数  $f(i)$  最小的节点  $i$ ,将其放入  $F$  中;
  - b) 如果  $i = d$ ,正向搜索到终点,成功退出;
  - c) 如果  $i \in G$ ,则双向搜索汇合,成功退出;
  - d) 扩展节点  $i$ 。
- 4) 如果  $|W| > |V|$ ,逆向搜索一步:
  - a) 从  $V$  中取出代价函数  $f(j)$  值最小的节点  $j$ ,将之放入  $G$  中;
  - b) 如果  $i = s$ ,逆向搜索到起点,成功退出;
  - c) 如果  $j \in F$ ,则双向搜索汇合,成功退出;
  - d) 扩展节点  $j$ 。
- 5) 转到步骤 2)。

3 实验及算法分析

实验选用基于 Kiwi 格式的全国地图作为实验数据,主要包括华北地区、珠三角地区以及长三角地区道路网。硬件环境:P4,1.8GHz,256MB 内存。

3.1 算法合理性

在北京西直门桥附近选取起始点和终止点,分别使用不考虑转向限制的算法以及本算法进行

规划,结果如图 3 和图 4 所示。图 3 所示的路径在实际交通中是不可通达的,图 4 所示路径才符合实际的交通行为。

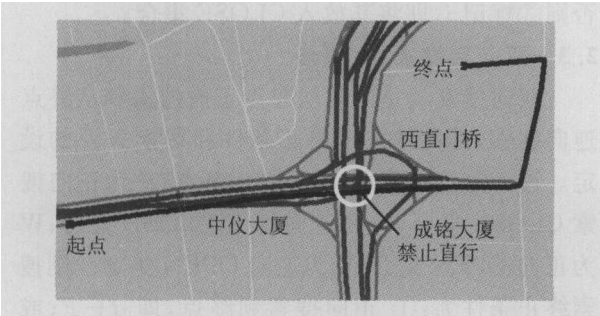


图 3 不考虑转向限制规划路径

Fig. 3 Planned Route Without Turn Prohibitions



图 4 考虑转向限制规划路径

Fig. 4 Planned Route with Turn Prohibitions

3.2 算法效率与精度

为了测试算法的效率和精度,笔者选取 8 条路径,如表 1 所示。其中 1~4 为区内搜索,5~8 为跨区搜索。随着距离越来越长,路段和节点就越来越多,网络规模越来越大。

表 1 用于实验的 8 条路径

Tab. 1 Eight Routes for Experiments

| 路径 | 描述    | 直线距离/km | 路段数     | 节点数     |
|----|-------|---------|---------|---------|
| 1  | 北京市内  | 10.5    | 41 316  | 12 674  |
| 2  | 北京市内  | 16.5    | 68 647  | 21 447  |
| 3  | 北京市内  | 24.0    | 72 941  | 22 805  |
| 4  | 北京市内  | 52.8    | 86 019  | 27 373  |
| 5  | 北京→天津 | 139.1   | 172 128 | 57 356  |
| 6  | 北京→济南 | 384.8   | 228 951 | 76 327  |
| 7  | 北京→上海 | 1 155.9 | 473 034 | 149 332 |
| 8  | 北京→广州 | 1 967.1 | 764 938 | 240 733 |

对每一条路径分别使用改进 Dijkstra 算法 ( $A^*$  算法中  $h(n) \equiv 0$  的情况)、启发式  $A^*$  算法、双向启发式  $A^*$  算法进行规划,结果见表 2。

图 5 利用 CPU 时间来衡量算法效率 ( $1/\text{CPU}$ ),图 6 使用 CPU 时间差来衡量 Dijkstra 算法与  $A^*$  算法以及  $A^*$  算法与双向  $A^*$  算法之间的相对效率:  $d\text{CPU}_{da} = (\text{CPU}_{\text{Dijkstra}} - \text{CPU}_{A^*}) / \text{CPU}_{A^*} \times 100\%$ ,  $d\text{CPU}_{ada} = (\text{CPU}_{A^*} - \text{CPU}_{BA^*}) / \text{CPU}_{BA^*} \times 100\%$ 。

表 2 3 种最短路径算法规划结果

Tab. 2 Planned Results of Three Shortest Path Algorithms

| 路径 | CPU 时间/s |       |       | 路径长度/km  |         |         |
|----|----------|-------|-------|----------|---------|---------|
|    | Dijkstra | A*    | 双向 A* | Dijkstra | A*      | 双向 A*   |
| 1  | 0.096    | 0.034 | 0.009 | 12.3     | 12.3    | 12.3    |
| 2  | 0.187    | 0.089 | 0.019 | 18.6     | 18.6    | 18.6    |
| 3  | 0.219    | 0.092 | 0.055 | 26.5     | 26.5    | 26.5    |
| 4  | 0.295    | 0.159 | 0.038 | 42.1     | 42.1    | 42.9    |
| 5  | 0.758    | 0.407 | 0.312 | 131.0    | 131.0   | 131.0   |
| 6  | 1.088    | 0.996 | 0.576 | 429.2    | 429.2   | 431.7   |
| 7  | 2.191    | 1.803 | 2.494 | 1 241.7  | 1 241.7 | 1 244.0 |
| 8  | 3.695    | 3.435 | 3.397 | 2 764.9  | 2 764.9 | 2 785.2 |

从图 5、图 6 中可以看出,  $A^*$  算法效率要比 Dijkstra 算法高;但随着路径变长,网络规模扩大,特别是跨区搜索时,  $A^*$  算法的优势不再明显。原因在于:随着路径变长,  $h(n)$  在  $f(n)$  中的权重降低。对于同一区域 (1~4), 双向搜索效率优势明显;对于跨区搜索 (5~8), 双向搜索效率优势不明显,甚至可能出现相反的结果,如路径 7。原因是跨区之后路网分布不均匀,双向搜索汇合地点不理想或不能汇合。随着路径变长,三种算法的效率都不能满足要求, VNS 通常要求 3 s 之内规划出 3~5 条路径。

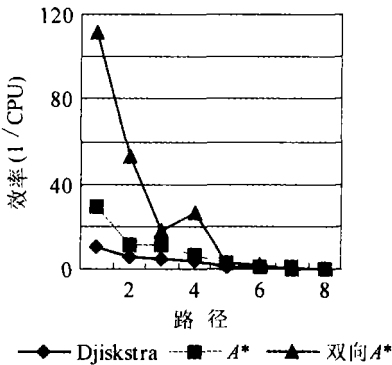


图 5 3 种算法效率比较

Fig. 5 Comparison Among Efficiencies of Three Algorithms

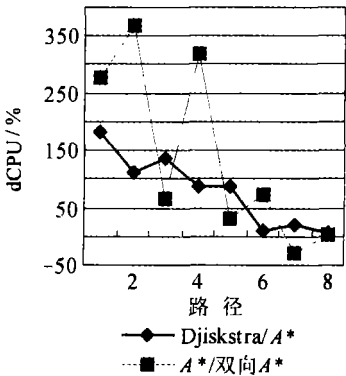


图 6 CPU 时间差

Fig. 6 Differences in CPU Time

从表 2 中可以看出, A\* 算法和 Dijkstra 算法规划得到的路径相同,可见 A\* 算法能获取数学意义上的最短路径。双向 A\* 算法比单向 A\* 算法获取的路径长,特别是跨区搜索时(路径 6~8),可见双向搜索获取的路径并不能保证数学意义上的距离最短,实际上是一种牺牲精度来获取效率的方法。

参 考 文 献

[1] 陆锋. 最短路径算法:分类体系与研究进展[J]. 测绘学报,2001,30(3):269-275

[2] Zhan F B. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks: Data Structures and Procedures[J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1997, 1(1): 69-82

[3] Zhan F B, Noon C E. Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks [J]. Transportation, 1998, 32(1): 65-73

[4] Zhan F B, Noon C E. A Comparison Between Label-Setting and Label-Correcting Algorithms for Computing One-to-One Shortest Paths[J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 2000, 4(2): 1-11

[5] Car A, Frank A U. General Principles of Hierarchical Spatial Reasoning-The Case of Wayfinding[C]. The Conference on Spatial Data Handling, Scot-

land, Edinburgh, 1994

[6] Car A, Mehner H, Taylor G. Experimenting with Hierarchical Wayfinding[R]. Department of Geomatics: University of Newcastle, 1999

[7] 陆锋,周成虎,万庆. 基于层次空间推理的交通网络行车最优路径算法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000,25(3):226-232

[8] 韩刚,蒋捷,陈军,等. 车载导航系统中顾及道路转向限制的弧段 Dijkstra 算法[J]. 测绘学报,2002,31(4):366-368

[9] 张可. 车辆导航系统关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2001

[10] 任刚,王伟,邓卫. 带转向延误和限制的最短路径问题及其求解方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004,34(1):1-5

[11] Añez J, de la Barra T, Pérez B. Dual Graph Representation of Transport Networks[J]. Transportation Research-B, 1996, 30(3): 209-216

[12] 蒋捷,韩刚,陈军. 导航地理数据库[M]. 北京:科学出版社,2003:84-88

[13] 朱福喜,汤怡群,傅建明. 人工智能原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002:31-44

第一作者简介:郑年波,博士生,现从事 LBS、GIS-T 以及车辆导航研究。  
E-mail:cool\_znb@163.com

A Bidirectional Heuristic Shortest Path Algorithm with Turn Prohibitions and Delays

ZHENG Nianbo<sup>1, 2</sup> LI Qingquan<sup>1, 2</sup> XU Jinghai<sup>2</sup> SONG Ying<sup>1</sup>

(1 Research Center of Spatial Information and Network Communication, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Firstly, a node-based topology relationship model of transport network is presented, in which the physical connection and the logical connection are described. Secondly, the structure of search node is defined in the sight of dual graph theory as a solution for turn prohibitions and delays in road intersections. At last, a bidirectional heuristic A\* algorithm based on search node is examined.

**Key words:** vehicle navigation system; route planning; shortest path algorithm; transport network; turn prohibitions and delays