

动态路网中基于实时路况信息的分布式路径生成算法

龙其¹ 叶晨² 张亚英²

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)¹

(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室 上海 201804)²

摘要 动态路网中的寻路问题在交通诱导和交通流仿真中有重要意义。提出一种基于实时路况信息的分布式路径规划算法,根据安装在道路路口的智能摄像头所采集到的交通参数对路口的畅通程度进行建模,估算车辆在路口间通行需要的时间。当有车辆需要交通诱导时,通过智能摄像头之间的网络进行基于网络路由思想的分布式最短路径寻路,在寻路过程中加入延时发送机制。网络中的智能摄像头根据车辆所在路口的畅通程度和到邻近路口的距离设置一定的延时,来广播路径询问数据包,使数据包能模拟当前的路况,从而有效、迅速地获得路径规划的结果。

关键词 动态路网,路径规划,最短路径,分布式查询,延迟路由,交通诱导

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.09.049

Distributed Path Generation Algorithm Based on Real-time Traffic Information in Dynamic Road Network

LONG Qi¹ YE Chen² ZHANG Ya-ying²

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)¹

(The Key Laboratory of Embedded System and Services Computing of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)²

Abstract The path finding problem in dynamic road network has important significance for traffic guidance and traffic flow simulation. This paper presented a distributed path planning algorithm based on real-time traffic information. We modeled the intersection unimpeded degree and estimated the time that vehicle travel between adjacent intersections requires based on the traffic parameters collected by smart cameras installed in the road intersections. When a vehicle needs to conduct a traffic induction, we found the shortest path through the network between the smart cameras like the network routing idea. We proposed a delay delivery mechanism in the process of path finding. According to the intersection unimpeded degree and the distance to the neighboring intersection, the smart cameras set a delay to broadcast the path finding packet. In this way, the path finding packet can simulate the current road conditions. Thus the path finding result can be obtained quickly and effectively.

Keywords Dynamic road network, Path planning, Shortest path, Distributed searching, Delay routing, Traffic guidance

1 引言

随着我国社会经济的发展,汽车拥有量迅猛增加,道路拥挤已成为城市交通的普遍难题。随着智能交通系统^[1]的发展,借助日益完善的城市道路与通信系统,根据实时的路况信息为出行的车辆进行行车路线上的诱导,对车流进行空间上的分流,实现交通流量的最优分布,能有效地缓解城市交通拥挤、堵塞等问题。

在大规模交通流仿真和城市交通诱导中,车辆获取最佳行驶路线时,由于交通路网信息是实时动态变化的,存在计算结果不准确的现象,如当前计算出的最优结果很可能随着动态路网的变化而变得不是最优。

目前,交通流建模的主要数据来源是浮动车辆的GPS数据^[2],这些数据信息量少,一般只包含车辆的位置信息,而且

大部分是来自城市出租车的记录,延时也相对较高。因此基于该数据进行交通流建模存在不准确和延时高等缺点。同时现有的交通诱导系统主要采用集中处理的方式,需要高性能的后台服务器来处理大量的数据。交通诱导系统主要是为车辆进行导航,其中的一个关键问题是计算最短路径,也就是路径规划问题。求解网络节点间最短路径的经典算法主要有Dijkstra、Floyd、A*^[3]等。近年来,人工智能领域涌现了如LPA*、D* Lite等^[4]新兴的动态路径规划算法,它们都源于启发式搜索的A*算法,但主要应用于动态变化环境中机器人路径探索等方面。Dijkstra算法是经典的计算最优路径的算法,目前很多路径规划算法都是在此基础上进行设计^[5],即以道路距离、质量等静态信息作为路阻来计算车辆的通行时间。但对于大规模的动态路网,道路上车辆的拥挤程度直接影响车辆的通行时间,因此直接采用该方法存在一定的缺陷。由

到稿日期:2013-10-09 返修日期:2013-12-30 本文受科技部国际合作专项(2012DFG11580),铁道部科研开发计划(2012X014-E),国家自然科学基金(61003221),上海市科委项目(11DZ1210404)资助。

龙其(1987-),男,硕士生,主要研究方向为嵌入式计算、智能交通, E-mail: longqi2007@gmail.com; 叶晨,男,博士生,主要研究方向为嵌入式计算、智能交通、无线网络; 张亚英,女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为网络与分布式计算。

于道路的状态、通畅程度时刻在变,在静态环境下计算出的最优路径可能与实际相差较多^[6]。

动态路网是一个时变网络,对于时变网络的最短路径问题,目前并没有十分精确的求解方案^[7]。Kiseok Sung^[8]等人基于时间窗格对动态路网进行研究,指出路段行驶时间随时间变化,提出了一种路段车流随时间变化的路网模型(Flow Speed Model)。基于此模型,Evangelos Kanoulas^[9]等人将路段车流速度按照不同时间分类,在此基础上进行路网节点间的最短路径查询。该模型中假设某一段时间中车流速度是一给定值或已知的时变函数,然而实际动态路网远比这复杂,因此难以应用到工程实践中^[10]。

本文提出一种分布式最短路径查询算法,即在路口实时交通流建模基础上将计算机网络中的路由思想引入到最短路径查询中,从而辅助进行实时的交通诱导。

2 实时路况信息建模与交通诱导

2.1 智能摄像头网络模型与数据采集

本文假定的交通场景如图1所示,在道路的各个路口布有智能摄像头,相邻路口的摄像头之间都有网络连接,能够实现相互之间的通信。我们用图 $G=(V,E)$ 来描述摄像头及其之间的关系, V 是各路口的智能摄像头节点, E 是摄像头之间的网络连接关系, $E=\{(u,v)|\text{摄像头 } u,v \text{ 间存在直接的网络连接关系}\}$,在本文的场景中,对于路网中任意相邻路口的摄像头 u 和 $v,(u,v) \in E$ 。

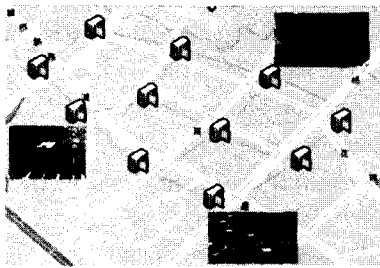


图1 路口智能摄像头与摄像头网络

每个路口智能摄像头实时监控路口的交通状况,其自带的视频识别模块能统计路口通行的车辆数,抓取车辆的特征,如车牌、颜色、车型等。

2.2 基于实时数据的路口交通流建模

路口智能摄像头通过捕获到车辆在相邻路口间出现的时间,来估算当前两路口间的平均通行时间。

本文将文献^[11]中的迭代学习方法进行简化,利用当前测得的车辆通行时间和上一次的结果来估计当前路口的平均通行时间。原方法主要是根据道路交通参数建立交通流的模型,依据车流速度、车流密度、道路长度、采样周期等参数,通过迭代来计算实时的交通流,由于无法直接获取某辆车的通行时间,因此迭代计算中用到的交通参数很多,这些参数本质上是为了精确估算车辆通行两路口的时间。而本文中假设智能摄像头能直接识别车辆,也就是能直接获得某车辆通行相邻路口的实际时间,因此可以把模型简化。

本文的迭代方法中,假设上一次统计的平均时间为 T_{old} ,当前一分钟内统计到的车辆的平均通行时间为 T_{new} ,则新计算出的平均时间如式(1)所示:

$$T_{cur} = \beta T_{old} + (1-\beta) T_{new} \quad (1)$$

其中, β 是(0,1)内的一个常数。

迭代流程如下所示:

- ①初始第0分钟,设置 $T_{old}=0$;
- ②通过智能摄像头获取数据 T_{new} ;
- ③根据式(1)计算 T_{cur} ;
- ④更新, $T_{old} \leftarrow T_{cur}$;
- ⑤进入下一分钟,重复②③④。

如此不停地迭代,实时估计车辆的通行时间。

2.3 道路延时转化为传播延时

利用上节的交通流模型计算出两个路口之间的平均通行时间后,为了满足后面最短路径查询的需求,本文将该平均通行时间转化成对应的数据包在网络中传输的时间,即传播延时。例如,当前路况下,从A路口到相邻的B路口车辆通行需要 T 分钟,那么按一定的比例把它转化成一个数据包从A路口的智能摄像头传递到B路口的智能摄像头所需的时间 t ms。

为了保证在网络中数据包传播的最短路径能够表示车辆在道路上行驶的最短路径,本文采用了线性函数来把车辆行驶时间转化成传播延时 t ,其中 k 为转换比例系数。

$$t = k \times T \quad (2)$$

这主要是因为:

(1)以等比例来转化延时,相当于把原来的路网交通图转化为一个权值更小的网络同构图,这样在网络同构图路由得到的最短路径即为原交通图的最短路径缩小相应比例。

(2)数据包在相邻摄像头之间传递速度很快,小于1ms。我们可以把车辆的行驶时间对应成数据包在相邻摄像头之间传递的延时,这个延时设置在10ms到1000ms之间,尽可能避免了数据处理与传递对结果的干扰。

通过这种方式来转换延时,比例系数 k 的选择将对结果产生较大的影响,后面的实验中将着重讨论。

2.4 基于实时路况信息的交通诱导方法

基于实时路况信息的交通诱导方法流程如图2所示:

- ①智能摄像头实时采集交通路口的路况信息,包括通行每个路口的平均车速与车辆数。
- ②对每个路口进行实时交通流建模,估算道路的拥挤程度,计算车辆通行时间。
- ③根据路口交通流模型,把车辆通行各路口之间的时间转化为网络传播延时。
- ④基于延时路由的方法进行分布式最短路径查询。
- ⑤指导车辆最优的行车路线。

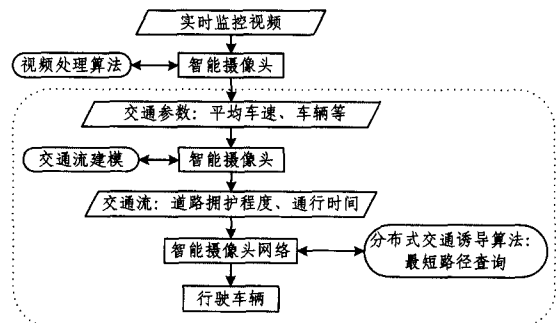


图2 基于实时路况信息的交通诱导

3 基于延时路由的分布式路径规划算法

3.1 分布式最短路径查询

本文中,分布式路径查询是指车辆查询到达某个路口的最短路径时,利用各个路口的智能摄像头一起来获取查询结果。在一次查询中,每个路口的智能摄像头只需设置一定的延时来广播一个数据包,单个节点计算量非常小。广播出去的数据包就像模拟车辆在道路上行驶一样,利用摄像头之间相互连接的网络,同一时间并行地尝试各种走法,迅速找到到达目的路口的最短路径。

3.1.1 传播延时表

根据前面实时路况信息的建模和延时转化,每个路口的智能摄像头实时维护到相邻路口的传播延时,如图 3 所示。这一数据记录在每个智能摄像头的传播延时表中,如表 1 所列。

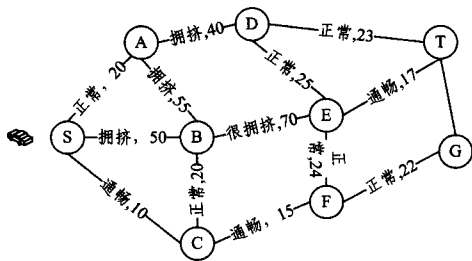


图 3 包含传播延时的智能摄像头网络示例

表 1 节点 S 的传播延时表

相邻摄像头 ID	传播延时
A	20ms
B	50ms
C	10ms

3.1.2 传播消息格式与查询消息表

进行分布式最短路径查询需要利用摄像头之间的网络传播查询消息和与之对应的回应消息。

查询消息格式为〈TYPE, GUID, 发送节点, 目的节点〉, 其中 TYPE 描述消息的类型, 包括查询消息和回应消息, GUID 是随机产生的一个全局唯一的量, 用来标记这一次查询的所有消息数据包; 发送节点是指消息的发送方, 若消息由 A 发送给 B, 则发送节点为 A; 目的节点指的是查询的目标路口摄像头 ID, 用来判断是否已经找到目标。

回应消息格式为〈TYPE, GUID, 路径节点数 n , 节点 1, 2, ..., n 〉。回应消息最终返回给提出查询的节点, 并依次包含最短路径的各个节点。

为了避免消息的重复发送和保证查询过程的简洁性, 每个智能摄像头节点有一个查询消息表, 如表 2 所列, 该表根据查询消息数据包格式而设定, 包括〈GUID, 上一跳节点, 消息到达时间〉。

表 2 消息查询表

GUID	上一跳节点	消息到达时间
123456	B	12:57:23
124245	D	12:56:49
...

3.1.3 分布式查询过程

当智能摄像头接收到路径查询请求后, 处理流程如图 4

和图 5 所示:

①起点(即接收请求的节点)生成查询消息数据包, 根据它到各个邻居路口的传播延时, 延时相应的时间发送给相应的摄像头, 如图 6 所示, 若节点 S 收到查询到 T 的最短路径的请求, 它将生成查询消息数据包, 然后延迟 20ms 发送给节点 A, 延迟 50ms 发送给节点 B, 延迟 10ms 发送给节点 C。

②中间节点接收到查询数据包后, 将继续按传播延时表中的延时发送给与之相邻的摄像头。如节点 A、B、C 收到查询数据包后, 将继续发送给 D、E、F 等节点。

③当消息到达目标节点后, 目标节点生成该查询的回应消息, 然后发送到查询消息表中的上一跳节点。

④当某个节点收到回应消息后, 根据 GUID 在查询消息表中查询上一跳节点, 同时将自己加入到回应消息的路径节点中, 然后将回应消息发送给消息查询表中的上一跳节点。

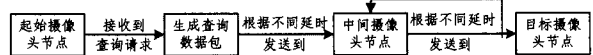


图 4 查询消息广播流程



图 5 回应消息传递流程

图 6 中, 车辆在 S 路口附近需要去往目的路口 T。此时, 路口间的摄像头已经通过路口实时交通流建模计算出任意路口间的拥挤程度和通行时间, 通过一定的比例将车辆通行时间转化为数据包的传播延时。这样, 最先到达 T 的消息就会沿着 S-C-F-E-T 的路径传输的。这也正确反映出了当前路况下车辆行驶的最优路径。

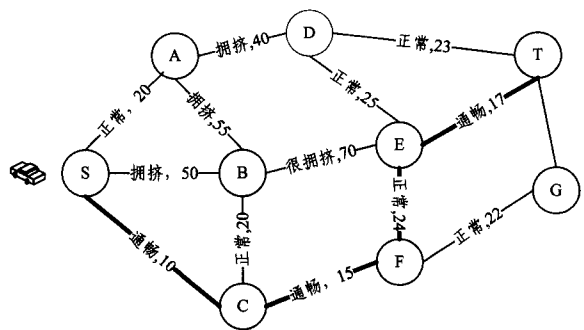


图 6 最短路径查询示例

节点接收到查询消息后, 首先根据 GUID 查询是否已经收到该查询的消息数据包, 若存在则丢弃数据包, 否则在查询消息表中建立一条记录, 包含消息数据包的 GUID 和上一跳节点(对应于收到数据包的发送节点)以及收到该消息的时间; 然后修改消息数据包的发送节点为自己; 再根据传播延时表的延时, 发送给其邻居节点。

节点收到回应消息后, 根据 GUID, 在查询消息表中找到对应的记录, 得到上一跳节点; 然后把自己的 ID 加入回应消息的路径节点中, 发送给上一跳节点。

3.2 最短路径查询广播范围限定

前面分布式延时路由的算法中, 查询消息在网络中的传递没有任何限制, 这导致每一次询问中消息都会在整个网络中的节点传播, 影响了节点的工作效率。在实际的情况下, 路

网中节点的分布比较均匀,最短路径存在的位置很大可能沿着起点到目标节点的直线附近,因此可以对查询消息进行传递范围的限制,在一定范围内进行传递。

限制数据包的传播区域是根据动态路网的空间分布特征而提出的,能够在大型路网中把数据包的传播区域限制在较小的范围里。椭圆模型是常用的一种控制路网规模的算法模型,椭圆算法最早由文献[12]提出,在文献[13,14]中得到发展与应用。

我们限定查询消息的椭圆传播范围,以起点 S 和终点 T 作为椭圆的焦点,一定长度为长轴作椭圆,这个值一般取 S 到 T 的距离的 1.5 倍,查询消息的传播控制在椭圆内的这些节点中,如图 7 所示,这样将大大减小查询消息传播的范围,提高节点运行的效率。

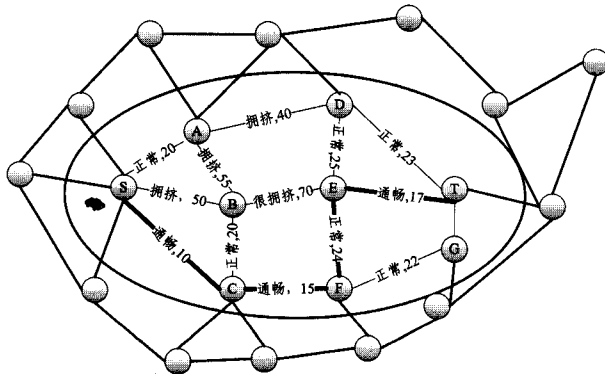


图 7 基于椭圆限制的查询消息传递

4 实验与分析

本文实验采用上海市地图的路网结构数据进行测试。路网中包含约 4500 个路口节点,如图 8 所示,路口间的车辆通行时间根据道路距离和实时路况生成。

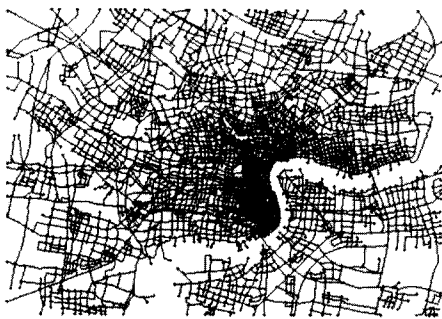


图 8 上海市路网结构图

4.1 实验 1

实验 1 主要是验证分布式最短路径查询正确性以及测试不同延时转换比例 k 对查询结果的影响。

根据式(2),我们把车辆在路网中的行驶时间按比例转化为数据包在网络中传播的延时。

在第一组实验中,我们把行驶时间 0.1 分钟到 30 分钟对应到传播延时 10ms 到 1000ms,计算出 $k=33.11$ 。根据地图信息,随机测试了 100 组点对(出发路口和目的路口)的行车时间。把基于分布式延时路由算法计算所得的最短路与 Dijkstra 算法计算出的实际最短时间进行比较,结果如图 9 所示。

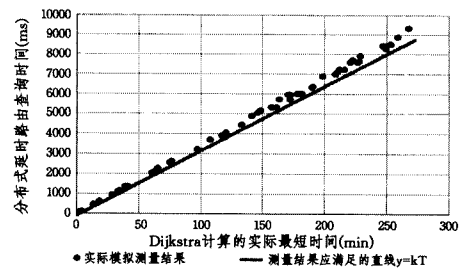


图 9 最短路查询测试结果一

从图中可以看出,通过分布式延时广播的方法计算所得的最短距离与实际的最短路距离符合正比例函数,且斜率与转换比例 k 十分接近,说明通过分布式延时路由由查询得到的最短路径与实际最短路径相符。实验测得的数据点略在直线 $t=kT$ 上方,这是由于数据包在节点间传递本身存在的延时引起的,不过由于差距很小,并不影响最短路的计算。

在第二组实验中,我们把行驶时间 0.1 分钟到 30 分钟对应到传播延时 10ms 到 600ms,计算出 $k=20.07$ 。随机测试了 100 组点对,得到的结果如图 10 所示。

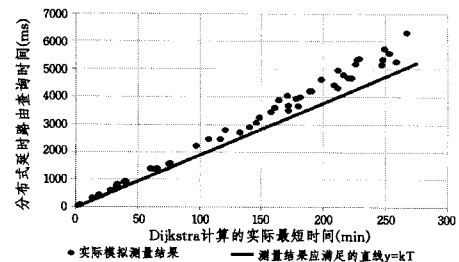


图 10 最短路查询测试结果二

从图中可以看出,实验结果与第一组实验大致一样,相比第一组实验,同样实际最短路径下,分布式延时路由由查询的时间更短,但误差更大。

实验中,对 k 的不同取值进行与第一、第二组相同的实验,并计算它们平均查询时间和误差,结果如表 3 所列。

表 3 不同 k 值下的平均查询时间与误差

k 取值	平均查询时间(ms)	平均查询误差(%)
13	2190.26	11.97
14	2298.18	10.07
15	2422.48	9.10
17	2710.90	8.21
20	3180.94	7.88
25	3863.88	5.86
33	4974.22	3.46
37	5475.74	2.24
40	5908.60	2.01
45	6629.06	1.86

从表 3 中可以看出,比例系数 k 对于分布式延时路由由查询的结果影响较大, k 取值太大会使得一次查询的时间增加,而 k 太小,查询的误差会变大。通过实验,在一般局域网条件下(相邻路口的网络延时小于 1ms), k 取值 15 到 37 之间是可行的。当 $k < 15$ 时,查询误差已经高于 10%,当 $k > 37$ 时,平均查询时间超过了 5s,查询效率低。

4.2 实验 2

实验 2 主要比较分布式最短路径查询对于并发查询的效率的提升。模拟实验中我们分别采用集中式的 Dijkstra 算

(下转第 278 页)

based on lattice-valued propositional logic LP(X) [C] // Ding Yong-sheng, Li Yong-min, Fan Zhun, et al. 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD2011). Shanghai: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011:1469-1473

[20] Xu Wei-tao, Xu Yang. α -Ordered linear resolution method for lattice-valued logic based on lattice implication algebra [J]. International Journal of Applied Management Science, 2012, 4(4): 460-479

[21] Zhang Jia-feng, Xu Yang. α -Semantic resolution method in lattice-valued logic [C] // Ding Yong-sheng, Li Yong-min, Fan Zhun, et al. 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD2011). Shanghai: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011:1152-1157

[22] 张家锋, 徐扬, 何星星. 格值命题逻辑系统 LP(X) 的语义归结方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2011, 30(4): 611-614

[23] 张家锋, 徐扬, 何星星. 格值语义归结推理方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 201-204

(上接第 262 页)

法和分布式延时路由算法对同一时刻随机的不同次数的并发查询进行实验, 统计两种算法完成所有查询的总时间, 结果如图 11 所示。

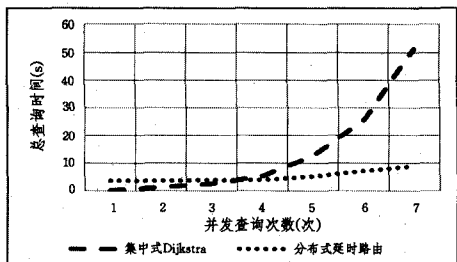


图 11 分布式延时路由与 Dijkstra 算法对比

从图 11 可以看出, 当并发查询很少时, 分布式路由查询并没有优势甚至不如 Dijkstra 算法, 这是由于分布式延时路由由查询要在网络中延时广播数据包而 Dijkstra 算法主要在中心服务器执行少量的最短路查询。但是, 当并发查询数量增大时, 分布式延时路由查询的总时间增长很缓慢, 而 Dijkstra 算法查询的总时间是个叠加的过程。因此在大规模的动态路网下, 并发查询多时, 分布式延时路由算法效率更高。

4.3 实验 3

实验 3 主要研究分布式延时路由查询在椭圆限制下数据包传播效率的提高。当没有进行任何限制时, 每一次最短路径的查询都需要把查询数据包在整个摄像头网络中进行传递, 如图 12 中水平线所示, 这种泛洪式的广播严重影响了网络的效率。在椭圆限制下, 广播次数显著减少, 图 12 示出在上海市交通图上进行查询时两点的直线距离与数据包广播次数的关系。

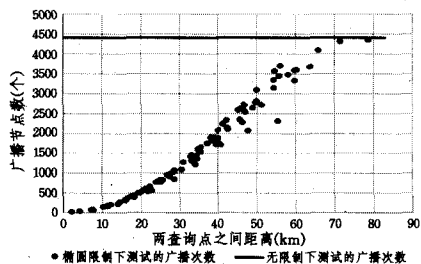


图 12 椭圆限制的最短路查询广播次数测试结果

从图 12 可以看出, 椭圆限制下的查询中, 查询点之间的直线距离越近, 广播的次数越少。动态路网中, 车辆在较短距离的查询比较多, 因此, 基于椭圆限制的延时路由能减少大量

数据包的传递。

结束语 基于延时的分布式路由算法适用于在实时变化的动态路网中查找两路口间的最短路径。结合广播区域的限制, 算法能够快速有效地运行。实验结果表明: 用分布式延时路由算法在摄像头网络中查找的最短路与实际路网中车辆行驶的最短路一致, 且使用椭圆限制的分布式延时路由算法能大大减小广播数据包的范围和次数, 使算法效率提高、资源消耗减少。

参考文献

- [1] 蒋捷, 韩刚, 称军. 导航地理数据库[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [2] Erik B, Park G, Toshi N. New Passive Traffic Detector[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 1997(1): 112-1151
- [3] 张翼, 唐国金, 陈磊. 时相关车辆路径规划问题的改进 A* 算法[J]. 控制工程, 2012, 19(5): 750-756
- [4] Koenig S, Likhachev M. D* Lite[C] // Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence. 2002: 476-483
- [5] 张歆奕, 吴今培, 张其善. 车载导航仪中路径规划算法及其实现[J]. 计算机自动测量与控制, 2001, 9(4): 15-17
- [6] 杨兆升. 城市交通流诱导系统理论与模型[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 12-49
- [7] Ahmed F, Deb K. A Multi-swarm Cooperative-based Gaussian Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm for Vehicle Path Planning[J]. Computational Information Systems, 2012, 8(6): 2325-2331
- [8] Sung K, Bell M G, Seong M, et al. Shortest paths in a network with time dependent flow speeds[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(1): 32-39
- [9] Kanoulas E, Du Y, Xia T, et al. Finding fastest paths on a road network width speed patterns[C] // Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering 2006: 10-19
- [10] 唐俊, 张栋梁. 基于路由机制的变权网络路径快速生成算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(12): 110-113
- [11] 候忠生, 金尚泰, 赵明. 宏观交通流模型参数的迭代学习辨识方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 64-71
- [12] Stig N, Bengt R. Computer cartography shortest route program [M]. Sweden: The Royal University of Lund, 1969
- [13] 崔伟宏. 空间数据结构研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- [14] 陈行星, 崔伟宏. 城市快速反应系统实验研究[J]. 遥感学报, 1996, 11(3): 227-233