

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.010

## 基于动态剪枝 P-region 的时空限制路径查询方法

史涯晴, 郝俊杰, 方连兴, 赵智轩

(中国人民解放军陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210000)

**摘要:** 为提供实时、精准的路径查询服务, 实现移动目标的路径规划, 以路网和移动目标为研究对象, 以时间和空间为查询条件, 提出一种基于动态剪枝 P-region 的时空限制路径查询方法。将空间索引的查询剪枝问题转化为非欧氏空间距离的快速查询问题, 并围绕数据预处理、索引设计、路网绘制和路径查询进行详细分析。实验结果表明, 动态剪枝算法能够在保证查询精度的前提下显著提升查询效率。

**关键词:** 剪枝; 时空限制; 路径查询

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Spatio-temporal Constrained Path Query Method Based on Dynamic Pruning P-region

Shi Yaqing, Hao Junjie, Fang Lianxing, Zhao Zhixuan

(College of Command & Control Engineering, PLA University of Army Engineering, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In order to provide real-time and accurate path query service and realize the path planning of moving objects, a spatio-temporal constrained path query method based on dynamic pruning P-region is proposed, which takes road network and moving objects as research objects and takes time and space as query conditions. The query pruning problem of spatial index is transformed into a fast query problem of non-Euclidean spatial distance, and the data preprocessing, index design, road network drawing and path query are analyzed in detail. The experimental results show that the dynamic pruning algorithm can significantly improve the query efficiency on the premise of guaranteeing query accuracy.

**Keywords:** pruning; spatio-temporal constrained; path query

### 0 引言

智能交通系统 (intelligent transportation systems, ITS) 是一种充分利用先进的信息技术、数据通信传输技术、计算机处理技术、电子传感技术以及电子控制技术等, 将传统的交通管理扩展到覆盖道路交通全过程, 综合考虑人、车、路、环境 4 要素相互作用、动态协调, 实现交通管理实时性、准确性和高效性的现代交通运输和管理系统<sup>[1]</sup>。有效利用智能交通系统实施出行规划, 缓解车辆剧增导致的城市交通拥堵问题是交通运输现代化的必然趋势。智能交通系统能够实施出行规划, 必须完成处理步骤如下: 1) 通过交通定位设备采集控制区域内路段的车辆信息; 2) 利用通信设备将实时车辆信息传送到控制系统中; 3) 借助高效的算法计算路径, 并在此基础上提供给出行者, 达到快速决策的目的。路网时空限制路径查询区别于传统的近邻查询<sup>[2-5]</sup>, 路网环境下, 后者主要是获取空间范围内的“最短”, 而时空限制路径查询包含空间与时间 2

层限制, 关注点是作为选择的一种“规划”, 例如“查询当前移动目标 12 min 内到达新街口的可能路径”, 那么出来的查询结果可能是多条路径, 再根据实际习惯和进一步的拥堵情况分析选择。

笔者围绕智能交通系统对路径查询的实时、精确要求, 设计基于动态 P-region 剪枝的时空限制路径查询方法, 并以该查询方法为基础, 围绕数据预处理、索引设计、路网绘制和路径查询分析 4 个功能模块, 实现基于时空限制的路径规划演示系统。

### 1 路网模型

路网是一种典型的非欧氏空间, 决定其中的移动对象必须受限于道路进行运动。图 1(a)为真实的路网。图 1(b)是对图 1(a)中真实道路网的图论化建模, 其中边表示路段, 边与边的连接点表示路口。移动车辆在路段中行驶时, 虽因拐点的原因可能造成行驶方向有所偏移, 但是行驶的状态与趋势在具体路段中一致; 因此, 考虑索引的便利和查询效率的提高, 选择路段作为路网的基本单元, 通常的表

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2019-12-24

基金项目: 中国博士后科学基金(2016M603030)

作者简介: 史涯晴(1981—), 女, 江苏人, 博士, 副教授, 从事时空数据管理、数据挖掘、智能交通系统研究。E-mail: yqshi\_nanjing@foxmail.com。

示方式是路段标识  $RID$  或者路段的起始和终止顶点  $(v_s, v_e)$ ，可以在 2 种表示方式之间建立 Hash 表来快速转换。

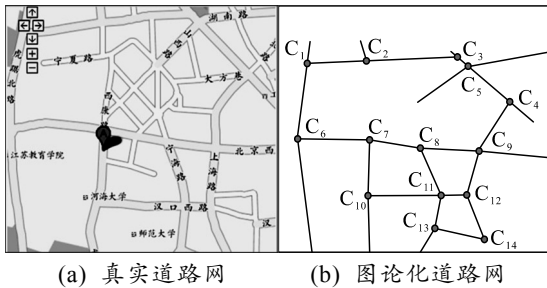


图 1 道路网建模

下面给出相关定义：

定义 1 路网。路网用图  $G=(V,E)$  来表示，图  $G$  中顶点集合  $V$  对应路网的路口，边的集合  $E$  对应路网的路段，每条边  $e(e \in E)$  存在属性集合  $\langle l(e), s(e) \rangle$ ，对应路段  $e$  的长度和最大限速。

定义 2 路段的最短时间。在每个路段  $e$  中移动对象以最大限速  $s(e)$  行驶所需的时间称为路段的最短时间  $t_m(e)$ ， $t_m(e)=l(e)/s(e)$ 。

定义 3 移动对象的样本位置。移动对象  $a$  在路网  $G$  中的样本位置表示为  $(OID, RID, v_i, l_i, t_i)$ ， $i=1,2,\dots,n$ ，其中， $OID$  表示移动对象  $a$  的标号， $RID$  表示路段的标号， $v_i$  表示移动对象  $a$  进入路段  $RID$  的顶点。由此可知： $a$  在路段  $RID$  中的行驶方向， $l_i$  表示移动对象  $a$  在  $t_i$  时刻路段  $RID$  中的位置，以其与  $v_i$  的距离表示。

路径查询算法中因为涉及到路段之间的连接关系，且路网规模越大，路口越多则连接关系越复杂，因此对路网在划分基础上进行存储，给出图划分的相关定义：

定义 4 图的划分。给定图  $G=(V,E)$ ， $V$  表示顶点的集合， $E$  表示边的集合。图  $G$  的划分  $\{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ ，其中  $g_i=(V_i, E_i)$ ， $i=1,2,\dots,k$ ，满足：

- 1)  $V=\cup V_i$ ;
- 2) 若  $i \neq j$ ， $V_i \cap V_j = \emptyset$ ;
- 3)  $\forall u, v \in V_i$ ，如果  $(u, v) \in E$ ，那么  $(u, v) \in E_i$ 。

## 2 时空限制路径查询方法

### 2.1 路径查询

现实生活中存在很多路网移动对象时空限制路径查询的应用：战场环境中追踪敌方物资保障车，判断可能行走路线，实施阻击；如图 2 所示，交通环境中缉凶过程结束后，通过路边监控的定位，推

断凶犯的可能逃窜路线，搜寻赃物与证物等。基于位置的服务<sup>[6-9]</sup>中，依据手机定位，感知特定人群的兴趣路径，进行实体广告投放等。

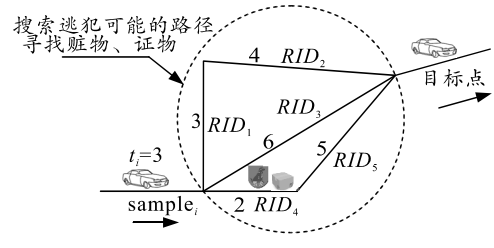


图 2 应用示例

时空限制路径查询是已知  $t_i$  时刻移动对象  $a$  的样本位置  $(OID, RID, v_i, l_i, t_i)$ 、目标点  $(RID, v_i, l_i, t_j)$ ，查询该移动对象在时间限制条件  $t$  内， $t=t_j-t_i$ ，到达目标点的所有可能路径  $ph_j$  的集合， $j=1,2,\dots,k$ ， $ph_j$  满足条件  $t_m(ph_j) \leq t$ ， $t_m(ph_j)$  表示移动对象在路径  $ph_j$  组成路段上以限速行驶的最短时间和。

### 2.2 路网索引

对路网的划分主要通过对数据进行分析，获得数据在横纵坐标上的最大与最小值，并对横坐标进行四等分，对纵坐标进行二等分。得到分割线的坐标值。路网划分如图 3 所示。

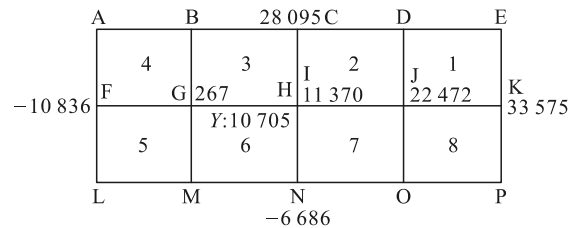


图 3 路网划分

路网中的数据被分为很多独立的矩形区域，之后进行分区域存储。依据得到的分割线坐标值，对读取的每一组路网数据进行判断，再分类存储到数据库，形成单一区域的数据。在此划分为 15 个区域。分割线有 7 条，分别是分割线  $IK$ 、 $CN$ 、 $FH$ 、区域  $CEKI$  内的  $DJ5$ 、区域  $IKPN$  内的  $JO$ 、区域  $ACHF$  的  $BG$ 、区域  $FHNL$  的  $GM$ 。被分割线分成 8 个矩形区域，编号为 1~8 区域。其中，分割线对应的区域，将其命名为 Area；8 个矩形区域，将其命名为 InArea。

对路网的索引区分路口信息和区域信息。路口信息即路网图中每一个路口的信息，包括坐标信息和所属区域的区域索引信息。区域索引是将路口信息和区域信息连接起来的桥梁。区域信息是每一个区域内部的信息。基本信息包括区域内的路口数量和路段数量。路口信息是该区域内所有路口的路口号。路段信息是每一个路段的信息，如路段号、路

段限速、路段长度等信息。通过对索引进行设计，在工程文件中建立 InArea 类、Area 类、LuKou 类 3 个类别。在区域类 Area 类和 InArea 类中各个元素的含义如表 1 所示。在 LuKou 类中各个元素含义如表 2 所示。

表 1 区域类元素

名称	含义	类型
intLuKouCount	路口总数	int 型
intLuCount	路段总数	int 型
intsLukouNum	路口编号	double[, ]2 维 double 型数组
intssAreaCrossing	相邻路口之间的长度	int[, ]2 维 int 型数组
intssAreaCrossingNum	路段编码	int[, ]2 维 int 型数组

表 2 LuKou 类元素

名称	含义	类型
intsLocation	区域索引	int[ ]1 维 int 型数组
X	路口 X 坐标	int 型
Y	路口 Y 坐标	int 型

### 2.3 动态剪枝 P-region

时空限制路径查询是查找设定的起点与终点间符合时空间条件的路径，并计算出该路径长度与通过的最短时间，需要解决 2 个问题：1) 路径经过顶点的选择，即顶点候选集的确定；2) 具体计算候选顶点组成路径的最短时间  $t_m(ph_i)$  是否符合时间限制  $t_m(ph_j) \leq t$ 。

起点与终点间的时空间间隔越大，顶点候选集越大，相应的路径最短时间和计算量也越大。如果采用简单遍历所有顶点后求路段时间和的方式，针对实际路网情况计算量巨大；因此，采用空间剪枝 P-region 的方式快速确定顶点候选集，达到减少搜索顶点个数，缩小可能路径查找范围的目的，实现加速搜索。

鉴于文中考虑移动对象在每条路段上移动速度不同，在同一个路段内移动速度也不同，直接用时间来替代距离表示显然会破坏路网原有的拓扑结构，不符合实际要求。在路径可能区域的确定中，将顶点间的时间约束转化为对应顶点的路网距离约束，利用路网拓扑结构关系缩小查找范围。空间剪枝 P-region 基于本课题组前期研究成果<sup>[10]</sup>提出，应用于时空限制的路径查询。

**命题** 已知路网上任意 2 个不同点  $u$ 、 $v$  间直线距离  $d$ ，用 P-region 表示  $u$ 、 $v$  间存在路网距离不大于  $r$  的路径可能区域，使得其中的任意顶点到  $u$ 、 $v$  的直线距离和不大于  $r$ 。

$$P\text{-region} = \left\{ (x, y) \left| \sqrt{(x + d/2)^2 + y^2} + \sqrt{(x - d/2)^2 + y^2} \leq r \right. \right\}.$$

为表示简单，如图 4 所示定义坐标：原点  $O$  在线段  $uv$  的中点， $x$  轴沿着线段  $uv$  方向， $y$  轴在点  $O$  垂直于  $x$  轴，点  $u$  到点  $v$  路网距离不大于  $r$  的路径可能区域图中椭圆形区域所示。如果路网上任意 2 个不同点  $u$ 、 $v$  间存在路径不大于  $r$ ，那么组成该路径的所有顶点均在 P-region 内。

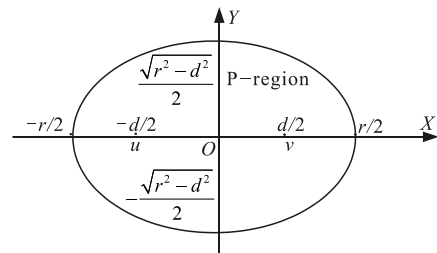


图 4 空间剪枝 P-region

由命题可知：只要知道路网中 2 个位置点  $u$ 、 $v$  间的直线距离  $d$  和这 2 个点间的路网最大距离  $r$ ，即可得到 P-region。P-region 区域设置得过大就会导致候选集没有有效的缩小，区域设置得过小会导致丢失可能路径。空间限制部分令  $u$  为查询设置的起点，即移动对象的当前位置， $v$  为查询设置的终点，预先计算两顶点间的直线距离  $d$ 。时间限制部分要求  $u$ 、 $v$  间可能路径的最小时间  $t_m(ph_j) \leq t$ ，移动对象速度的最大值取实际城市道路的最大限速  $s_{\max} = 70 \text{ km/h}$ ，因此， $u$ 、 $v$  间距离  $r \leq ts_{\max}$ 。以此作出起点到终点间的空间剪枝区域 P-region，在后续具体计算可能路径的过程中，只要将该区域内的顶点作为查询候选集即可。随着移动对象的不断移动，起点位置不断变化，剪枝区域 P-region 也随之变化，形成“动态剪枝”。

### 2.4 系统设计

依据设计的基于动态剪枝 P-region 的时空路径查询方法设计路径规划演示系统，包含数据预处理、索引设计、路网绘制和路径分析处理 4 个功能模块。

数据预处理，通过网络获取原始的路网数据，对路网数据进行处理转化，生成适合本系统的数据信息。再将原始数据分块，将每一块和每一条分割线上的数据分开存储，最后将分块的数据保存成合适的格式。目的是方便路口信息的定位和路网数据的查询。数据索引的设计实现，设计良好、合适的数据结构来存储分块的数据。在系统初始化阶段，

读取分块数据，以相应的数据结构进行存储，方便查询函数的调用。路网绘制主要是通过读取预处理后的数据文件，载入并绘制路网地图；实现对生成路网图的基本操作，包括对图的拖动，以鼠标为中心进行缩放。路径分析处理，进行时空条件的路网查询，即查询符合时空限制条件下的路径，再针对查询结果进行输出，包括文字输出和图像输出 2 类，文字输出就是直接输出路径信息，指导用户进行选择；图像输出则是将结果在路网图上标注出来，使用户有直观的体验。如图 5 所示，系统的操作界面风格简约，操作性强，符合人的基本操作习惯，实现人机友好交互。

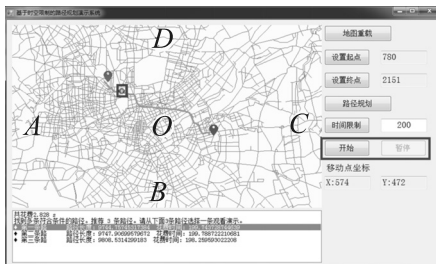


图 5 实验点设置

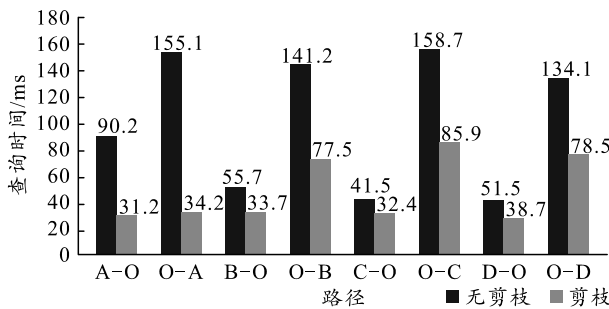


图 6 不同路径采用不同算法时间对比

### 3 实验结果及分析

实验用剪枝算法和不用剪枝算法分别进行 10 次路径查询，分别对比 2 种算法的效率。为了排除路径长度对算法性能的影响，分别在整个路网 4 个方向和中心位置选择 5 个点，为了排除起点终点的方向性问题，相同 2 个点交换起、终点分别进行实验。采用整个地图的最大最小坐标组合而成的外围 A,B,C,D 4 个点和整个地图中心位置的点 O。如图 5 所示，5 个点坐标分别为：A (-10 836,10 705)、B (11 370,28 095)、C (33 575,10 705)、D (11 370,-6 686)、O (11 370,10 705)。A 点至 O 点表示起点是 A，终点是 O。

由于不采用剪枝算法得到的路径必定是最短路径，因此，用剪枝算法得到的路径长度必定长于非剪枝算法得到的路径长度。图 6、图 7 的数据表明：动态剪枝算法可以显著提升算法查找效率，平均效率提升 44.36%，这是因为空间剪枝策略巧妙地缩小了查询候选集规模，减少搜索顶点个数，降低最终路径和的计算量，使得查询效率显著提升。

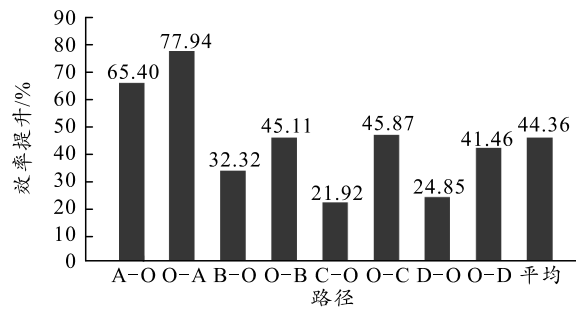


图 7 动态剪枝不同路径算法效率比较

### 4 结束语

基于动态剪枝 P-region 的时空路径查询方法在实际交通系统、军事环境和基于位置服务等领域均有广泛的应用前景。查询方法能够为智能交通系统提供实时、精准的路径查询服务，实施出行规划，缓解车辆剧增导致的城市交通拥堵问题，是交通运输现代化的必然趋势。笔者提出基于几何学方法的查询优化处理策略——动态剪枝 P-region 策略，巧妙地将空间索引的查询剪枝问题转化为非欧氏空间距离的快速查询问题，从而提高了路网移动对象时空限制路径查询效率。

#### 参考文献：

[1] 百度百科. 智能交通系统 [EB/OL].(2015-07-07) [2019-02-01].http://baike.baidu.com/view/1488750.htm.  
 [2] CHO H J, JIN R. Efficient processing of moving k-range

nearest neighbor queries in directed and dynamic spatial networks[J]. Mobile Information Systems, 2016(5): 1-17.  
 [3] CHO H J, JIN R, CHUNG T S. A collaborative approach to moving-nearest neighbor queries in directed and dynamic road networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2015, 17(Part A): 139-156.  
 [4] YU Z, LIU Y, YU X, et al. Scalable distributed processing of k nearest neighbor queries over moving objects[J]. TKDE, 2015, 27(5): 1383-1396.  
 [5] ZHONG R, LI G, TAN K L, et al. G-Tree: An efficient index for KNN search on road networks[C]. CIKM'13, 2013: 9-48.  
 [6] SHU X. Research on mobile location service design based on Android[C]//in Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom'09. 5th International Conference on, 2009: 1-4.  
 [7] VU H Q. Exploring the travel behaviors of inbound tourists to Hong Kong using geotagged photos[J]. Tourism Management, 2015(46): 222-232.

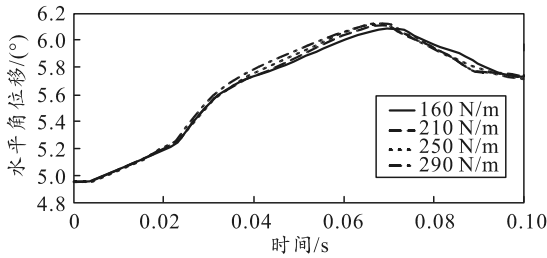


图 13 不同复进簧刚度下的枪口水平角位移

由图 12 可知,不同复进簧刚度对后坐运动过程中枪口的垂直角位移影响不大。自动机后坐位时,复进簧刚度越大,对枪托体的冲击载荷越小,此时引起的枪口垂直角位移幅值也越小。自动机复进过程中,复进簧的刚度越大,给予自动机加速度就越大,使其对机框的撞击力就越大,导致枪身的翻转力矩也就越大。

从图 13 可知:随着复进簧刚度的逐渐增大,自动机在复进运动时的速度就越快,枪身内部活动机件因碰撞产生的碰撞力越大,使得枪口的水平角位移越大,但总体影响不是很明显。

### 4 结论

笔者通过建立卧姿有依托抵肩射击的人枪系统动力学模型,仿真分析了自动机在人体枪架发射过程中的运动特性对枪口位移的影响,实验验证了所建模型的可行性。通过仿真、理论分析得出以下结论:

1) 导气孔直径越大,自动机获得的初速越大,使其在后坐过程中枪身内部活动机件受到的碰撞力越大,引起的枪身振动较剧烈,对射击精度影响较大;导气孔直径过小,会使自动机获得的初速不够,

枪身后坐时间过长,导致整个自动循环时间过长,直接影响枪械射击精度。

2) 随着复进簧刚度的增大,可有效减小自动机后坐过程中枪身内部活动机件的碰撞,但在复进到到位时,会产生较大的冲击载荷,使枪口振动剧烈;复进簧刚度过大,会导致后坐不到位,刚度过小,影响自动机循环时间,使复进时间过长。

### 参考文献:

[1] HUTEHING T D, RAHE A E. Study of Man-Weapon Reaction Forces Applicable to the Fabrication of a Standard Rifle Firing Fixture[R]. ADA034523, 1975.

[2] 包建东,王昌明,孔德仁,等.连发射击人枪系统机械导纳测量与分析[J].南京理工大学学报,2006(4): 521-524.

[3] 包建东,王昌明,孔德仁,等.人枪运动对射击精度影响的实验研究[J].仪器仪表学报,2006(6): 1273-1276.

[4] 包建东.人-枪相互作用试验研究[D].南京:南京理工大学,2006.

[5] 孙睿敏.手枪击发前动力学特性研究[D].太原:中北大学,2015.

[6] 薛钧.刚柔耦合系统发射动力学特性的仿真分析[D].南京:南京理工大学,2008.

[7] HANAVAN E P. A mathematical of the human body[M]. Aerospace Medical Research Laboratories, Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command, 1964: 446-448.

[8] 唐刘建,温垚珂,徐诚,等.手枪弹侵彻软防护人体胸部靶标的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2018(1): 106-110, 117.

[9] 郑召辉.模拟人体枪架结构设计及动力学仿真[D].南京:南京理工大学,2008.

based services in Android using GPS and Web services[J]. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 2012(9): 237-242.

[10] FENG J. A Study on Multi-scale/Multi-theme map information model and nearest neighbor search method[D]. PhD in Information Engineering, University of Nagoya, Japan, 2004: 56-59.

(上接第 44 页)

[8] IBRAHIM O A, MOHSEN K J. Design and Implementation an Online Location Based Services Using Google Maps for Android Mobile[J]. International Journal of Computer Networks and Communications Security (CNCS), 2014(2): 113-118.

[9] SINGHAL M, SHUKLA A. Implementation of location