

基于多目标遗传算法的浮动车地图匹配方法

谷远利, 陆文琦, 邵壮壮

(北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 针对低频浮动车数据存在定位误差、数据缺失等问题, 提出了一种基于多目标遗传算法的地图匹配方法 (multi-criteria genetic algorithm-based map-matching method, MGA-MM), 多目标遗传算法的适应度由空间相似度、修正的最短路径和方向相似度加权得出, 引入动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 技术估计定位路径和修正路径之间的空间相似度, 并利用 A* 算法计算修正轨迹的最短路径. 选择北京市海淀区低频浮动车 GPS 数据进行相应实验测试, 测试结果表明该地图匹配方法具有理想的匹配精度且匹配速度较快, 当采样间隔为 10 ~ 20 s 时, 匹配正确率达 93.7%, 能够满足工程应用中低频浮动车地图匹配实时性和准确性的要求.

关键词: 低频浮动车; 地图匹配; 多目标遗传算法; 动态时间规整; A* 算法

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2019)06-0585-08

doi: 10.11936/bjtxb2017110042

Multi-criteria Genetic Algorithm-based Map-matching Method for Floating Car Data

GU Yuanli, LU Wenqi, SHAO Zhuangzhuang

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Ministry of Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To reduce the error and missing of the low-sampling-rate floating car data, a map-matching method based on multi-criteria genetic algorithm (MGA-MM) was established in this paper. The fitness function of the multi-criteria genetic algorithm contained the geometric similarity, distance of the shortest path and direction similarity. The dynamic time warping technique was introduced to estimate geometric similarity between recorded trajectory and observed route, and the distance of the shortest path was calculated by A* algorithm. The data of low-sampling-rate floating car in Haidian District of Beijing was selected to conduct the corresponding test. Result shows that MGA-MM has ideal matching accuracy and fast running speed. When the interval of the sample is 10 ~ 20 s, the matching accuracy reaches 93.7%, which can satisfy the timeliness and accuracy of the map-matching of low-sampling-rate floating car data in traffic engineering.

Key words: low-sampling-rate floating car; map matching; multi-criteria genetic algorithm; dynamic time warping (DTW); A* algorithm

浮动车数据采集是智能交通领域重要的信息采集技术, 利用车辆装载的 GPS 获取车辆的实时经

度、纬度、速度、方向等信息数据, 可以实现路网状态评估与预测、智能交通诱导、高精度地图生成等目

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 北京市科技计划资助项目(Z121100000312101)

作者简介: 谷远利(1973—), 副教授, 主要从事交通规划、交通管理与控制、智能交通方面的研究, E-mail: ylg@bjtu.edu.cn

标。但是,浮动车数据本身存在缺失与误差^[1],获取的定位点数据与地图中的道路数据不能完全匹配,由此需要地图匹配算法对浮动车数据进行有效处理。

目前,国内外的地图匹配算法研究已有丰硕的成果,地图匹配根据算法类型^[2]不同可分成4类,分别是基于几何学、拓扑学、概率论和机器学习的算法。近期的代表性成果有: Yin 等^[3]通过计算 Fréchet 距离来选择与 GPS 轨迹最相似的路径作为匹配路径; Lou 等^[4]提出了一种经典的多因素加权的 ST 匹配算法(ST-matching method, ST-MM),主要包括选择备选点集合、空间因素分析、时间因素分析以及结果匹配4个步骤; Yuan 等^[5]在 ST-MM 的基础上提出了一种基于相互投票的地图匹配算法,该方法利用前后轨迹点之间的印证关系,有效地提高了低采样率条件下轨迹点匹配的准确率。 Newson 等^[6]建立了隐马尔科夫链模型以寻找经纬度点最有可能的对应的路径,从而实现了地图匹配; Xu 等^[7]利用偏移距离和采样点间的时空关系作为条件随机场模型中 GPS 轨迹的特征,当采样率低的情况下,驾驶者偏好将增强 GPS 点的时空关系,提高了低采样率下的匹配关系; 孙丽娜等^[8]在对路网进行网格划分的基础上,提出了一种利用历史数据和前瞻数据的三段式匹配思想与传统权重思想结合的匹配算法,该算法降低了算法复杂度,匹配精度较高。

目前,低频浮动车数据的地图匹配利用的算法和模型大多基于几何分析、路网拓扑和概率分析,利用机器学习和启发式方法模型较少。

本文提出一种基于多目标遗传算法的地图匹配算法(multi-criteria genetic algorithm-based map-matching method, MGA-MM),属于一种启发式方法。首先提出利用动态时间规整技术取代 Fréchet 距离^[3]计算轨迹之间的相似度,并利用 A* 算法计算候选点之间的最短距离。MGA-MM 算法采用基于轨迹空间相似度、最短路径距离和方向相似度的多目标遗传优化算法,将空间相似度、最短路径距离和方向相似度加权组合作为遗传算法的适应度函数。利用在北京市海淀区收集的低频浮动车数据进行地图匹配实验,验证了该方法的精确性和适用性。

1 基本概念

1.1 地图匹配

浮动车数据地图匹配^[9]是借助路网信息将一连串用户位置信息映射到数字地图上的过程。在

低频采样条件下,不仅采样点存在位置误差,而且采样点间跨越多个路段和交叉口,采样点所在的路段间拓扑关系缺失^[10],因此地图匹配不仅需要定位点映射到路网上,还需要获得浮动车精确的行驶轨迹。

1.2 道路网络

在一个给定的道路网络 $G(E, V)$ 中, E 代表边的集合, V 代表顶点的集合, (w, v) 代表连接节点 w 与顶点 v 的边, 边的权重为 $\text{dist}(w, v)$ 。

1.3 浮动车轨迹点和候选点

浮动车轨迹点 $N = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 是由一系列服务器按时间顺序记录的序列点的集合, 每个点 p_i 包含的属性信息有 car id、longitude、latitude、speed、direction、date 和 time。浮动车候选点集 $C = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,j}\}$ 则是浮动车轨迹点 p_i 在 GPS 误差半径为 r_{error} 的圆内映射到路网 $G(E, V)$ 上的 j 个投影点。 p_i 的投影点也是 p_i 与路段 $e_{i,j}$ 上候选点中距离最小的点, 如图 1 所示, 计算公式为

$$C = \arg \min_{\forall c_{i,j} \in e_{i,j}} \text{length}(c_{i,j}, p_i) \quad (1)$$

式中: C 为轨迹点 p_i 在误差半径 r_{error} 的圆内的各路段 $e_{i,j}$ 上的候选点集合; $\text{length}(c_{i,j}, p_i)$ 为路段 $e_{i,j}$ 上候选点 $c_{i,j}$ 与轨迹点 p_i 的欧式距离。

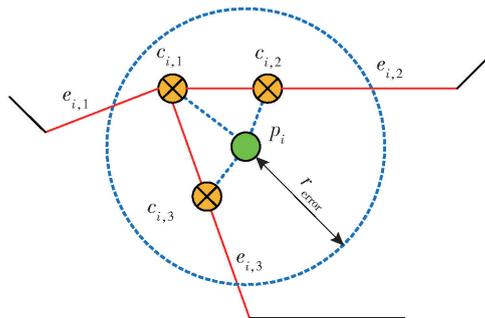


图1 浮动车轨迹点 p_i 与候选点示意

Fig. 1 Diagram of observed point p_i and the candidate points

2 基于多目标遗传算法的地图匹配方法

2.1 基本步骤

该方法是一种全局地图匹配算法,所谓全局地图匹配,就是利用候选点重建行驶轨迹 $P: p_{e_1, e_2} \rightarrow p_{e_2, e_3} \rightarrow \dots \rightarrow p_{e_{n-1}, e_n}$ 的过程,通常适用于路径判断困难的低频浮动车数据。这种全局匹配算法在路网 $G(E, V)$ 中,首先要选择每个轨迹定位点可能的候选点的集合,再根据遗传算法的步骤创建初始种群,进行种群的适应度计算,本文的适应度函数是基于

匹配轨迹的空间相似度、最短路径长度及方向相似度这3种指标加权得出的。下文介绍了3种指标的计算方法,完成适应度计算后进行遗传算法的必要

步骤:选择运算、交叉运算和变异运算,最终通过一系列迭代过程得到最优解即匹配结果,具体步骤如图2所示。

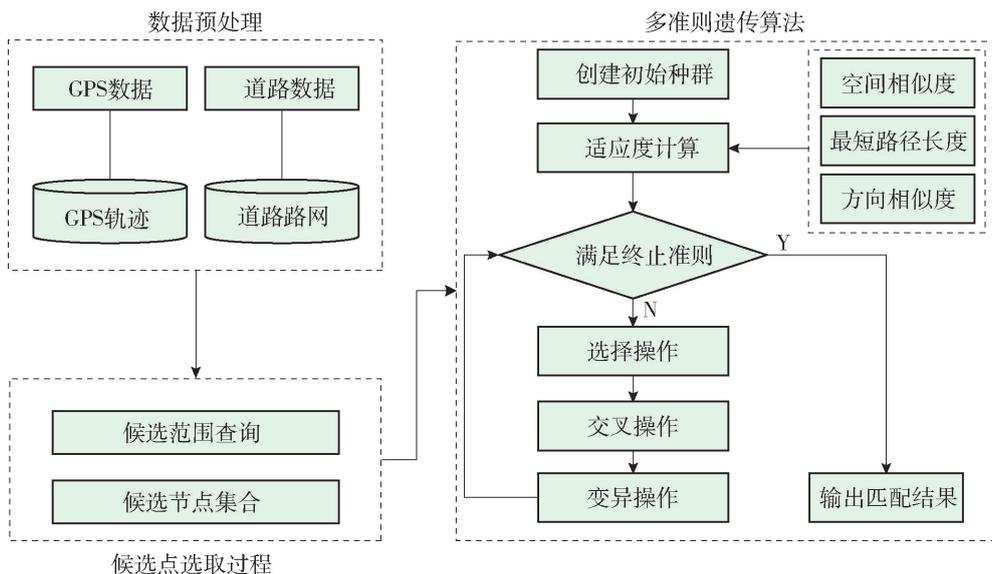


图2 MGA-MM 方法流程
Fig.2 Flow diagram of MGA-MM

2.2 空间相似度计算

动态时间规整^[11] (dynamic time warping, DTW),是一种衡量2个不同长度时间序列的相似度的方法,它是一种针对存在全局或局部扩展、压缩或变形的柔性模式进行的匹配,可解决动态模式的相似性度量问题。早期,DTW技术主要应用于语言识别、手势识别和信息检索中,如今已在基因排序、故障诊断和数据挖掘等领域得到了广泛应用。

本文创新性地引入DTW技术计算观测轨迹与匹配后路径轨迹之间的空间相似程度,作为适应度函数计算的重要组成。

已知浮动车轨迹点和候选轨迹节点序列集合分别为 $N = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m\}$ 和 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_n\}$,规整路径 Q 的定义为 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_K)$,且 $q_k = (i, j)_k = (i_k, j_k)$, $\max(m, n) \leq K \leq m + n$,则DTM目标函数为

$$f_1 = \text{DTM}(N, C) = \frac{1}{\sum_{k=1}^K w_k} \min \left\{ \sum_{k=1}^K w_k d(i_k, j_k) \right\} \quad (2)$$

式中: $d(i_k, j_k)$ 为 q_k 中对应着2个序列 p_i 和 c_j 之间的欧式距离; w_k 为加权因子,在本文中取值为1。

2.3 最短路径距离计算

在低频定位数据下,2个修复点间车辆的行驶

距离较远,在这段没有定位数据的距离内,可以假定车辆更倾向于遵循最短距离的路线行驶,利用最短路径信息作为额外变量来增强匹配效果^[12-13]。

如图3所示,若点 $c_{1,1}, c_{1,2}, c_{1,3}$ 为轨迹点 p_1 的候选点, $c_{2,1}, c_{2,2}, c_{2,3}, c_{2,4}$ 为轨迹点 p_2 的候选点,假定选择 $c_{1,1}$ 到 $c_{2,1}$ 作为 p_1 到 p_2 的修复轨迹,则利用相应算法求解 $c_{1,1}$ 到 $c_{2,1}$ 的最短路径距离 $\text{dist}(c_{1,1}, c_{2,1})$,即图3蓝色线所示轨迹,则有 n 个轨迹点的候选匹配路径最短距离为

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n-1} \text{dist}(c_{i,m}, c_{i+1,k}) \quad (3)$$

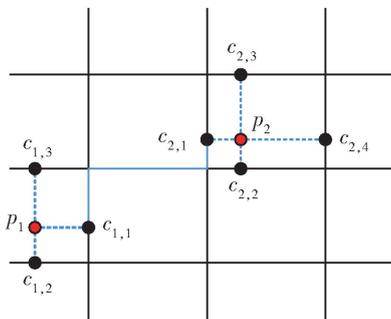


图3 最短路径距离示意图

Fig.3 Diagram of the shortest path

本文采用A*算法求解2个候选点间的最短路径距离,A*算法是Hart等^[14]在经典Dijkstra算法基础上提出的启发式最短路径算法。该算法在运行过

程中,假定一条由节点 s 到节点 t 的最短路径, A^* 算法不仅需要记录节点 s 到当前节点 v 的当前最短路径距离 $\text{dist}(v)$, 还需要计算当前点 v 到终点 t 的最短路径估计距离 $\text{heur}(v)$, 利用 OPEN 表和 CLOSE 表记录每个节点的状态, 且每个节点 v 只能出现在其中的一个表中, A^* 算法具体步骤如下:

1) 初始化, 对于所有节点 $v \in V$, 令 $\text{dist}(v) = \infty$, $\text{OPEN} = \{s\}$, $\text{CLOSE} = \{\}$, $\text{father}(v) = \text{null}$, 估计 $\text{heur}(v)$;

2) 从 OPEN 表中移除 $(\text{dist}(v) + \text{heur}(v))$ 值最小的节点 m , 将 m 放入 CLOSE 列表中;

3) 判断 2) 中放入 CLOSE 列表的节点 m 的相邻节点 n , 若 n 在 CLOSE 表中, 则不做处理, 否则, 若 $\text{dist}(n) > \text{dist}(v) + \text{dist}(v, n)$, 则令 $\text{dist}(n) = \text{dist}(v) + \text{dist}(v, n)$, $\text{father}(n) = m$;

4) 重复上述 2) 和 3) 直到 OPEN 表为 null, 或者从 OPEN 中选中的节点为终点 t .

本文采用的 A^* 算法利用的估计值 $\text{heur}(v)$ 为节点 v 到目标点 t 的欧氏距离, 因为欧氏距离是两点之间物理空间上可能的最小距离. 由于 A^* 算法在搜索过程中省略大量冗余的搜索路径, 因此比 Dijkstra 算法的效率更高.

2.4 方向相似度计算

浮动车道路匹配点连线的方向角 (α) 与浮动车行驶方向角 (β) 之间的夹角称为方向误差角^[15] ($\Delta\alpha$), 本文利用方向误差角 ($\Delta\alpha$) 衡量匹配的方向相似度, 如图 4 所示.

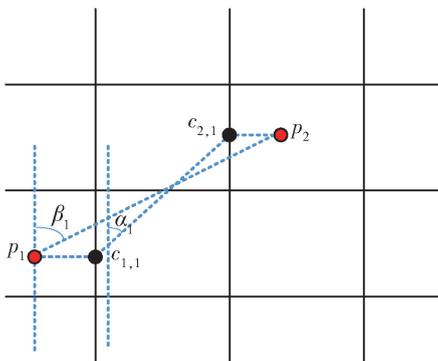


图 4 方向误差角示意

Fig. 4 Diagram of the error of direction angle

α_1 为候选点 $c_{1,1}(x_1, y_1)$ 、 $c_{2,1}(x_2, y_2)$ 连线与正北方向的夹角, $[x_1, y_1]$ 和 $[x_2, y_2]$ 分别为 $c_{1,1}$ 和 $c_{2,1}$ 的位置向量, β_1 为轨迹点 p_1, p_2 连线与正北方向的夹角, l_1 为轨迹点 p_1, p_2 连线的欧几里得距离, 浮动车道路匹配点连线的方向角 α_1 的计算公式为

$$\alpha_1 =$$

$$\begin{cases} \left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)\right) \times \frac{180}{\pi}, & x_2 - x_1 > 0 \\ \left(\frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)\right) \times \frac{180}{\pi}, & x_2 - x_1 < 0 \\ 180, & x_2 - x_1 = 0, y_2 - y_1 < 0 \\ 0, & x_2 - x_1 = 0, y_2 - y_1 \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

β_1 通过浮动车观测数据得到, 则 $\Delta\alpha_1$ 为

$$\Delta\alpha_1 = \begin{cases} |\alpha_1 - \beta_1|, & |\alpha_1 - \beta_1| \leq 180 \\ 360 - |\alpha_1 - \beta_1|, & |\alpha_1 - \beta_1| > 180 \end{cases} \quad (5)$$

则 n 个轨迹点的候选匹配路径的方向相似度为

$$f_3 = \sum_{i=1}^{n-1} (l_i \times \Delta\alpha_i) \quad (6)$$

2.5 多目标遗传算法

遗传算法 (genetic algorithms)^[16] 是 1962 年 Holland 提出的模拟自然界遗传机制和生物进化而形成的一种并行随机搜索最优化方法. 传统的遗传算法目标函数或者适应度函数为单一形式, 而在工程运用中, 经常需要对多准则和多目标进行择优设计^[17-19], 但这些目标时常相互冲突, 如本文地图匹配中, 适应度函数可以是轨迹相似度、最短路径距离以及方向相似度, 由此需要对多目标进行优化, 多目标问题的一般数学模型为

$$\begin{aligned} V\text{-min } f(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s. t. } & x \in X \\ & X \subseteq \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (7)$$

$V\text{-min}$ 表示向量极小化, 使各个子函数都尽可能达到极小化, 本论文针对于多目标问题采用权重系数变换法求解 Pareto 最优解^[20], 即多目标问题的有效解, 对每一个子目标函数 $f_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 赋予权重 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 其中 w_i 为相应的 $f_i(x)$ 在多目标优化问题中的重要程度, 则各个子目标函数 $f_i(x)$ 的线性加权和表示为

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i(x) \quad (8)$$

此方法将 $F(x)$ 作为评价函数, 利用权重系数变换法将多目标转化为单目标, 再利用符号变量编码取代原有的二进制编码, 利用遗传算法求解得到最终的匹配结果.

MGA-MM 方法的具体步骤如下:

1) 初始化. 设置种群规模 N , 最大进化代数 G , 以及初始种群向量 $\mathbf{P}(0) = (x_1, x_2, \dots, x_N)$.

2) 个体评价. 计算各个体的轨迹相似度 $f_1(x_i)$ 、路径长度 $f_2(x_i)$ 、轨迹方向度 $f_3(x_i)$, 个体适应度 (fitness) 记为 $f(x_i)$, $f(x_i)$ 计算公式为

$$f(x_i) = \frac{1}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} f_1(x_i) + \frac{1}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} f_2(x_i) + \frac{1}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} f_3(x_i) \quad (9)$$

3) 选择操作. 根据 2) 中的结果, 将种群个体按适应度值的升序排列, 取前 k 个作为优良个体遗传到下一代.

4) 交叉操作. 将交叉算子 w_c 作用于群体 $P(t)$, 对于选中的成对个体, 以一定的概率交换它们间的部分染色体, 产生新个体, 如图 5 所示.

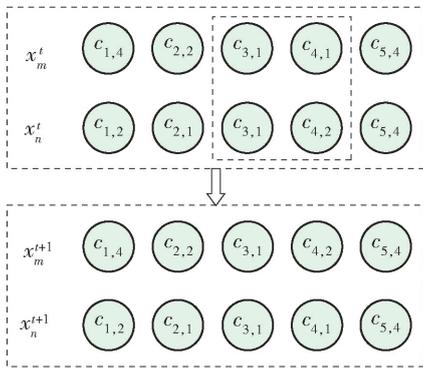


图 5 交叉操作示意

Fig. 5 Crossover of the MGA-MM

5) 变异操作. 将交叉算子 w_m 作用于群体 $P(t)$, 对于选中的成对个体, 以一定的概率改变其等位基因, 产生新个体, 如图 6 所示.

6) 终止条件判断. 若 $g \leq G$, 则 $g = g + 1$, 转入步骤 2); 若 $g > G$, 则输出最优解.

3 实验和分析

3.1 实验数据与环境条件

为验证本文提出的基于多目标遗传算法的低频

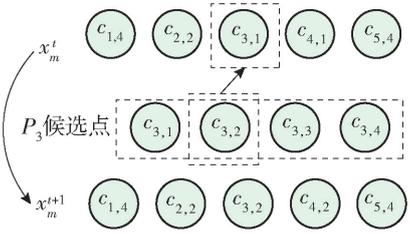


图 6 变异操作示意

Fig. 6 Mutation of the MGA-MM

浮动车地图匹配方法 (MGA-MM), 设计了相关检验实验. 采用的数据为北京泓达九通科技公司提供的北京市海淀区浮动车数据, 原始数据集时间为 2017 年 4 月 1 日至 2017 年 4 月 30 日的 1 000 辆浮动车约 174 万条的原始位置信息记录, 数据格式如表 1 所示, 采样间隔为 10 ~ 60 s. 所采用的地图数据为北京市矢量电子地图, 如图 7 所示, 坐标系为 WGS-84.

测试环境为个人电脑, 操作系统为 Windows10, 性能配置为 Intel CORE i5 处理器, 2.50 GHz, 6.00 GB 内存, 以 Visual Studio 2013 C++ 为算法编程平台, MySQL 数据库存储数据, 实现地图匹配功能.



图 7 北京市海淀区区域路网与浮动车 GPS 数据

Fig. 7 Road network of Haidian district in Beijing and GPS data of floating car

表 1 浮动车 GPS 观测数据

Table 1 GPS observed data of the floating car

车辆 ID	经度	纬度	速度	方向	日期	时间
1133591	116.362 47	39.985 97	46	6	2017-04-01	07:32:03
1133591	116.362 48	39.985 98	50	6	2017-04-01	07:32:13
1133591	116.362 56	39.985 87	46	4	2017-04-01	07:32:25
1133591	116.362 47	39.986 07	46	4	2017-04-01	07:32:47
1133591	116.362 56	39.986 94	32	12	2017-04-01	07:33:02

为了满足实验验证需要,本文从大量的原始记录中,通过数据库筛选处理得到信号传输良好、时间序列较为完整、采样频率较高(采用间隔均在10 s左右)、路径清晰的10辆浮动车轨迹数据,并将此轨迹作为匹配实验的正确轨迹参考,通过删减高频数据得到采样间隔分别10~20 s、20~30 s、30~40 s、40~50 s、50~60 s的地图匹配实验数据。

3.2 实验结果与数据分析

3.2.1 匹配质量分析

本文设计的实验以匹配正确率(correct matching percentage, CMP)为评价指标,即匹配正确的轨迹点数量占全部所选匹配的轨迹点数量的比重。

$$CMP = \frac{N_C}{N_A} \times 100\%$$

式中: N_C 为正确匹配的轨迹点数目; N_A 为参与匹配的轨迹点数目。

实验抽取3.1节中处理间隔为10~20 s、20~30 s、30~40 s、40~50 s、50~60 s的浮动车GPS轨迹点进行地图匹配,每种采样间隔均测试100个点左右,测试的结果利用编程实现可视化并采用人工观测的方式进行结果校验。测试的可视化区域结果和单点结果如图8、9所示,其中红色点位为浮动车GPS数据观测点,橙色为推断的匹配候选点,蓝色为最终推断的浮动车轨迹。采样间隔与匹配正确率的关系如图10所示,其中选择ST-MM^[4]作为本文方法正确率的对比方法。



图8 可视化结果区域示意

Fig. 8 Diagram of area visualization results

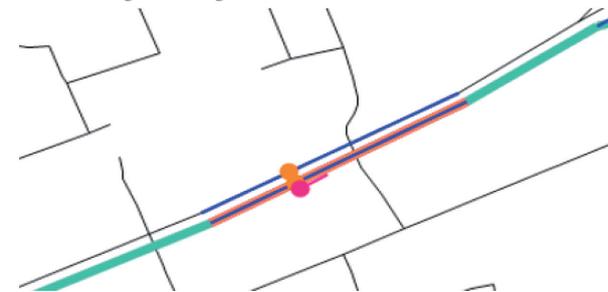


图9 可视化结果单点示意

Fig. 9 Diagram of single point visualization results

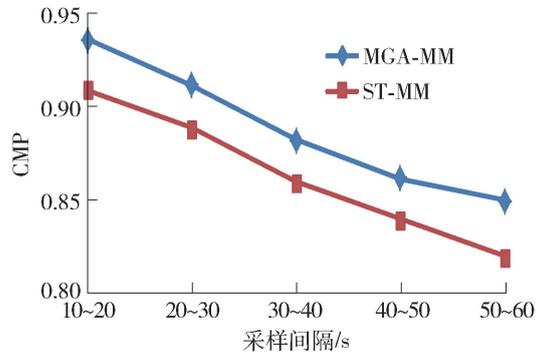


图10 采样间隔与匹配正确率的关系

Fig. 10 Relationship of sampling time interval and CMP

由图10可知,MGA-MM方法的匹配正确率随着采样间隔的增大而降低,但是降低的幅度不大,当采样间隔达60 s时,匹配的正确率仍在80%以上。与ST-MM对比可得,MGA-MM的正确率更高,当采样间隔为10~20 s时,样本的匹配正确率为93.7%,匹配质量较高。

3.2.2 匹配效率分析

为测试本方法的运算效率,在不同采样间隔条件下,对点位数目不同的轨迹进行匹配实验,记录程序运行时间,结果如图11所示,随着轨迹点数目的增多,运算时间的增幅逐渐增大,运算效率降低。因此在使用MGA-MM方法进行浮动车长轨迹多点匹配时,可以将较长的轨迹分段的观测点数量控制在10个以内,既保证了匹配精度,也提升了匹配效率。

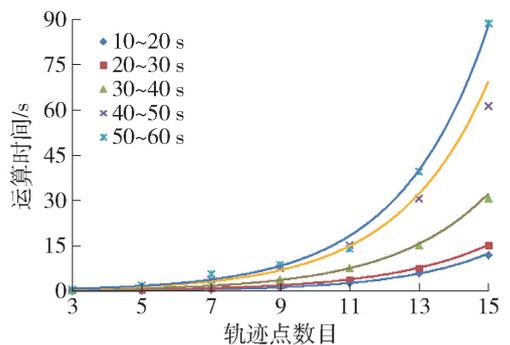


图11 轨迹点数目与运算时间的关系

Fig. 11 Relationship between running time and the number of route points

3.2.3 匹配影响因素分析

本文引入DTW技术计算轨迹的空间相似度,为研究轨迹空间相似度对于匹配结果的影响,构建了MGA-MM(a)和MGA-MM(b)模型,MGA-MM(a)即本文的MGA-MM模型,将轨迹空间相似度、最短

距离和方向相似度3个因素纳入适应度函数,MGA-MM(b)模型仅将最短距离和方向相似度纳入适应度函数,采用的实验过程与3.2.1小节一致,收集实验匹配正确率和匹配时间。

实验结果如图12所示,通过匹配正确率柱状图和平均时耗折线图可知,利用DTW估计轨迹空间相似度加入适应度函数计算可以有效提高模型的匹配正确率,各采样率下正确率提高了10%左右,但同时造成了每个点平均匹配耗时的增加,且随着采样间隔的增大,平均时耗差值由0.054 s逐步增加到0.400 s。

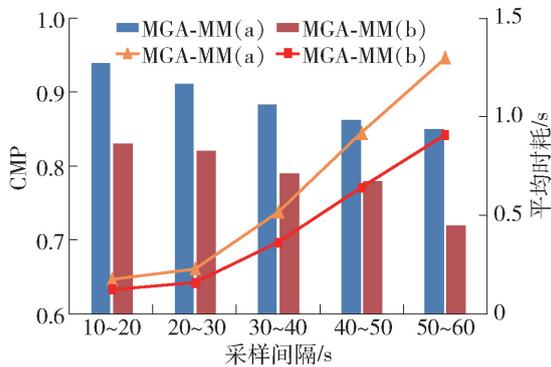


图12 采样间隔与匹配正确率和平均时耗的关系
Fig. 12 Relationship between sampling time interval and CMP, average time consumption

4 结论

1) 本文针对低频浮动车数据存在定位误差、数据缺失等问题,提出了一种基于多目标遗传算法的地图匹配方法(MGA-MM),以轨迹空间相似度、最短距离和方向相似度加权融合作为遗传算法的适应度函数,并引入DTW技术计算观测轨迹和匹配后的路径轨迹之间的空间相似度,提高了匹配正确率。

2) 通过匹配质量分析得出,MGA-MM匹配正确率较高,不同采样间隔条件下,MGA-MM的匹配质量均优于ST-MM,该算法能够应用于动态交通的低频浮动车数据地图匹配。

3) 通过匹配效率分析得出,MGA-MM单条匹配路径轨迹点数量越多,运算时间增幅越大,因此建议对长路径轨迹进行分段匹配,降低时耗。

4) 通过影响因素分析得出,引入空间相似度对MGA-MM的匹配精度有明显提升,同时运算平均时耗也有所增加。

5) 本文的后续工作将进一步优化DTW算法和

最短路径算法,在时间复杂度方面进一步优化MGA-MM,提升算法效率。

参考文献:

- [1] 李清泉,黄练. 基于GPS轨迹数据的地图匹配算法[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 207-212.
LI Q Q, HUANG L. A map matching algorithm for GPS tracking data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2): 207-212. (in Chinese)
- [2] QUDDUS M A, OCHIENG W Y, NOLAND R B. Current map-matching algorithms for transport applications: state-of-the-art and future research directions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(5): 312-328.
- [3] YIN H, WOLFSON O. A weight-based map matching method in moving objects databases [C] // Proceedings of International Conference on Scientific and Statistical Database Management. Piscataway: IEEE, 2004: 437-438.
- [4] LOU Y, ZHANG C, ZHENG Y, et al. Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories [C] // Proceedings of ACM Sigspatial International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2009: 352-361.
- [5] YUAN J, ZHENG Y, ZHANG C, et al. An interactive-voting based map matching algorithm [C] // Proceedings of Eleventh International Conference on Mobile Data Management. Piscataway: IEEE, 2010: 517-520.
- [6] NEWSON P, KRUMM J. Hidden Markov map matching through noise and sparseness [C] // Proceedings of ACM Sigspatial International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2009: 336-343.
- [7] XU M, DU Y, WU J, et al. Map matching based on conditional random fields and route preference mining for uncertain trajectories [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1-13.
- [8] 孙丽娜,董劲男,郑啸天,等. 一种基于浮动车移动轨迹与电子地图融合的道路匹配算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2015, 53(4): 710-714.
SUN L N, DONG J N, ZHENG X T, et al. A road-matching algorithm based on fusion of moving trajectory and electronic map [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2015, 53(4): 710-714. (in Chinese)
- [9] 沈敬伟,周廷刚,张弘. 基于改进AOE网络的低频浮动车数据地图匹配算法[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 497-503.

- SHEN J W, ZHOU T G, ZHANG H. A map-matching algorithm based on improved AOE network for low frequency floating car data [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50 (3): 497-503. (in Chinese)
- [10] 王美玲, 程林. 浮动车地图匹配算法研究[J]. *测绘学报*, 2012, 41(1): 133-138.
- WANG M L, CHENG L. Study on map-matching algorithm for floating car [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41 (1): 133-138. (in Chinese)
- [11] MÜLLER M. *Dynamic time warping* [M]. Berlin: Springer, 2007: 69-84.
- [12] QUDDUS M, WASHINGTON S. Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 328-339.
- [13] 李清泉, 胡波, 乐阳. 一种基于约束的最短路径低频浮动车数据地图匹配算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(7): 805-808,885.
- LI Q Q, HU B, LE Y. Flowing car data map-matching based on constrained shortest path algorithm [J]. *Geomatics and Information of Wuhan University*, 2013, 38(7): 805-808,885. (in Chinese)
- [14] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. *IEEE Transactions on System Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
- [15] 姚恩建, 左婷. 基于低频浮动车数据的实时地图匹配算法[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(6): 909-913.
- YAO E J, ZUO T. Real-time map matching algorithm based on low-sampling-rate probe vehicle data [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39 (6): 909-913. (in Chinese)
- [16] HOLLAND J H. *Adaptation in natural and artificial system*[M]. Cambridge: The MIT Press, 1992: 90-118.
- [17] TARAFDER A, LEE B C S, RAY A K, et al. Multi-objective optimization of an industrial ethylene reactor using a nondominated sorting genetic algorithm [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44 (1): 124-141.
- [18] KURIAKOSE S, SHUNMUGAM M S. Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by non-dominated sorting genetic algorithm [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2005, 170(1): 133-141.
- [19] AHMED F, DEB K. Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms [J]. *Soft Computing*, 2013, 17 (7): 1283-1299.
- [20] SARKAR D, MODAK J M. Pareto-optimal solutions for multi-objective optimization of fed-batch bioreactors using nondominated sorting genetic algorithm [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(2): 481-492.

(责任编辑 吕小红)