

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.06.021

交叉路段的自适应投影地图匹配算法及应用

付小雪¹, 罗赞文², 刘振东²

(1. 上海健康医学院, 上海 201318; 2. 上海交通运输研究中心 大数据研究院, 上海 200031)

摘要: 针对目前已有的地图匹配算法在城市交叉路口背景下进行地图匹配时出现的容易波动、空匹配、错误匹配、匹配准确率降低等问题, 提出一种交叉路口背景下的自适应投影地图匹配算法。首先利用设置距离最大值法对异常的定位信息进行剔除, 并且根据前两个时刻的连续车辆定位点采用插值算法补全缺失的定位数据。基于从开放街图 OSM 官网下载的城市地图信息, 通过与高德地图进行比对, 补全开放街道地图 OSM 所缺失的道路信息, 为了提高候选道路查询效率, 缩短匹配时间, 对电子地图生成网格索引及利用误差圆的计算确定候选道路集合。其次, 分别构造车辆投影距离和方向角的概率函数, 并且自适应调整各自的权重系数。最后融合车辆投影距离和方向两个影响因素, 结合相应的自适应调整权重系数计算候选道路的概率, 确定车辆所行驶的实际道路, 提高路网匹配的准确率。采用常州市 1 800 多辆出租车车辆实时行驶数据对此算法进行了试验验证及仿真比较。结果表明: 与其他现有 3 种匹配算法相比, 尤其在交叉路口背景下, 提出的自适应投影地图匹配算法的准确率可提高 4% 左右, 单点匹配时间缩短 1.5 ms 左右, 大大提高了路网匹配的准确度, 也缩短了单点匹配时间, 提高了地图匹配算法性能。

关键词: 城市交通; 地图匹配; 自适应投影算法; 交叉道路; 候选道路

中图分类号: U121

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 06-0161-08

An Adaptive Projection Map Matching Algorithm for Intersecting Roads and Its Application

FU Xiao-xue¹, LUO Zan-wen², LIU Zhen-dong²

(1. Shanghai University of Medicine & Health Science, Shanghai 201318, China;

2. Big Data Institute, Shanghai Transport Research Center, Shanghai 200031, China)

Abstract: In view of the problems of easy volatility, empty matching, wrong matching and low matching accuracy by performing the existing map matching algorithm on the background of urban intersecting roads, an adaptive projection map matching algorithm on this background is proposed. First, the abnormal locating information is eliminated by using the method of setting distance threshold, and the missing locating data are completed by using the interpolation algorithm according to the continuous vehicle locating points of the first 2 moments. Based on the city map information downloaded from the official website of the Open Street Map (OSM) and comparing with the AutoNavi map, the road information missed from the OSM is completed. In order to improve the query efficiency of candidate roads and shorten the matching time, a grid index is generated for the electronic map and the calculation of the error circle is used to determine the set of candidate roads. Second, the probability functions of the vehicle projection distance and direction angle are constructed respectively, and the respective weight coefficients are adjusted adaptively. Finally, considering both projection distance and direction, the probabilities of the candidate roads are calculated with the respective weight coefficients to determine the actual road and improve the matching accuracy or road

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LQ15A010009)

作者简介: 付小雪 (1986-), 女, 山东济南人, 博士. (383431362@qq.com)

network. The test verification and simulation comparison of the algorithm are conducted by using the real-time driving data of more than 1 800 taxis in Changzhou City. The result shows that compared with the other 3 existing matching algorithms, especially on the background of intersecting roads, the accuracy of the proposed adaptive projection map matching algorithm can be increased by about 4%, and the single-point matching time can be shortened by about 1.5 ms, which greatly improves the road network matching accuracy, shortens the single-point matching time, improves the performance of the map matching algorithm.

Key words: urban traffic; map matching; adaptive projection algorithm; intersecting road; candidate road

0 引言

智慧交通有关的应用都是基于轨迹的,其核心是对道路上车辆的GPS轨迹数据进行精确定位,即地图匹配^[1-5]。典型的GPS轨迹是一系列顺序的轨迹点。每个GPS点由纬度、经度和时间戳信息组成。但是由于GPS自身的局限性,GPS数据的采样和计算过程以及定位数据的接收和返回过程都有可能产生误差,进而导致不准确的GPS数据^[6-11]。因此,需要对原始数据进行处理,然后在路网上使用,也就是地图匹配。地图匹配算法的输入应该是GPS点标记的位置信息、道路网的邻接信息以及车辆的其他行驶信息。而关键问题是如何通过综合各方面信息快速准确地推断出车辆的行驶路线^[12-17]。目前国内研究和应用的地图匹配算法多种多样^[18-20]。

现有的地图匹配算法存在空匹配、匹配错误等问题^[21-28],当待匹配的数据量迅速增加时,匹配效率往往大幅降低。针对上述问题,本研究提出了一种交叉路段背景下的自适应投影地图匹配算法,根据道路的不同类型,自适应调整权重和计算变量,实现城市复杂路网下的精准地图匹配,并且即使在大规模匹配数据量情况下,减少了单点匹配时间。

1 算法实现

1.1 数据预处理

地图匹配是将车辆的定位信息匹配到相应道路上的过程。本研究中,车辆的定位信息是通过安装在车辆的车载终端设备获取,地图的数据信息通过OSM(Open Street Map, OSM)官网下载获取。OSM地图数据是免费开放的,是通过全球志愿者提供的,OSM地图数据主要有Node(节点)、Way(道路)和Relation(关系)3种类型^[29-31]。由于城市道路错综复杂,车辆的定位信息经常会由于建筑物、立交桥、高架路以及地下隧道的遮挡产生一定的误差,导致接收到异常数据。因此,为了减少定位信息的

异常对匹配准确率的影响,需要提前对定位信息进行预处理。首先去除定位信息的异常数据,其次,利用插值法补全缺失的定位数据。通过车载终端设备,我们获取的车辆定位信息包括车辆的经纬度、车辆方向角、车速、时间等^[32-35],剔除定位信息的异常数据原理如图1^[11]所示。

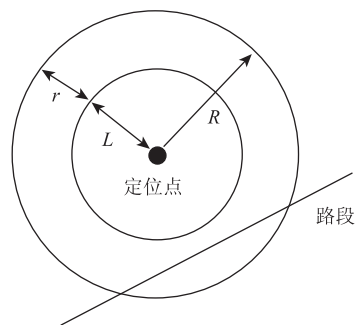


图1 去除原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elimination principle

根据定位的误差和车辆的最大偏移确定距离的最大值,将大于距离最大值的定位点进行去除,距离最大值也被称为距离阈值 $R_{\max}$,计算公式见式(1):

$$R_{\max} = (V_{\max} + V_s) \cdot \delta t + r, \quad (1)$$

式中, $V_{\max}$ 为道路最大限速; V_s 为瞬时速度误差; δt 为车辆定位信息采样间隔时间; r 为置信水平一定下的定位数据误差圆的半径; $R_{\max}$ 为车辆的最大偏移距离和误差圆半径的和;如果定位点到道路的距离超过 $R_{\max}$,那么此定位点被剔除,反之,保留此定位点。

除了剔除定位异常点之外,本研究还利用插值算法补全定位点坐标,插值原理如图2所示。

其中 (x_i, y_i) 是需要补全的定位点坐标, (x_{i-1}, y_{i-1}) 为前一时点的定位点坐标, v_{i-1} 为前一时点车辆的速度, $\varphi_{i-1}, \varphi_{i-2}$ 分别为前两个时刻的定位点的车辆方向角,即为车辆的行驶方向与正北方向的夹角。因此的 (x_i, y_i) 计算公式如下:

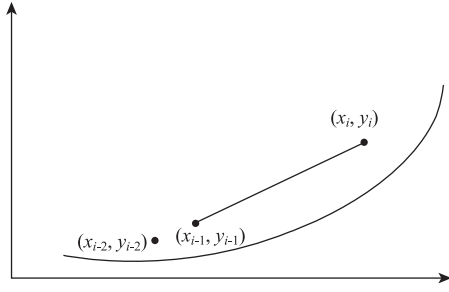


图2 插值原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interpolation principle

$$x_i = x_{i-1} + v_{i-1} \cdot \delta t \cdot \sin[(\varphi_{i-1} - \varphi_{i-2}) + \varphi_{i-1}] \quad (2)$$

$$y_i = y_{i-1} + v_{i-1} \cdot \delta t \cdot \cos[(\varphi_{i-1} - \varphi_{i-2}) + \varphi_{i-1}] \quad (3)$$

除了对车辆定位信息进行数据预处理之外, 还需对待匹配的原始地图数据进行预处理。本研究中我们使用的地图数据是从 OSM 地图网站^[36-37]下载的, 因此需要对地图数据进行处理为所需的待匹配地图数据, 主要为地图信息的道路检测与补全。对车辆定位信息以及地图数据进行预处理之后, 需要对整个电子地图进行网格划分, 进行地图匹配时, 会首先确定定位点所在的网格, 然后再找出本网格所包含的所有候选路段, 可以大大提高查询的速度, 缩短路网匹配时间。

1.2 候选匹配道路集合 R

车辆定位数据以及地图数据进行预处理之后, 对整个电子地图进行网格划分, 确定了实际道路的大概区域。目前使用误差椭圆的算法确定一个椭圆区域。计算公式如式 (4)~(6) 所示, 其中, a 为椭圆的长半轴; b 为椭圆的短半轴, 车辆经纬度的标准差以及协方差分别为 σ_x , σ_y , σ_{xy} , 其中 σ_0 为可变参数, 椭圆长半轴与正北方向的夹角用 φ 表示。

$$a = \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} + \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + 4\sigma_{xy}^2}} \quad (4)$$

$$b = \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{2(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} + \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + 4\sigma_{xy}^2}} \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}\right) \quad (6)$$

根据误差椭圆计算公式, 如果采用误差椭圆的算法, 计算量比较复杂, 因此在本研究中, 我们简化了误差椭圆的计算方法, 将定位点的坐标 (x_i, y_j) 作为椭圆的中心, 因此计算可以简化为公式

(8), 简化后椭圆的长轴和焦距分别为 $2a'$ 和 $2c'$ 。定位点所在的网格通过网格索引进行确定。

$$a' = R \cdot \delta t, \quad (7)$$

$$c' = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (8)$$

以此网格为中心的 3×3 网格内的误差圆包含的道路作为候选路段。全部候选匹配道路集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

1.3 确定匹配路段

1.3.1 概率函数分配

(1) 投影距离概率构造

定位点到某条道路的投影距离分为两种情况, 如图 3 所示, 因此定位点到某一条道路的投影距离计算方式也分为两种。投影距离为路网匹配中很重要的指标, 也就是说, 车辆到候选道路的投影距离越小, 车辆越有可能行驶在该条道路。

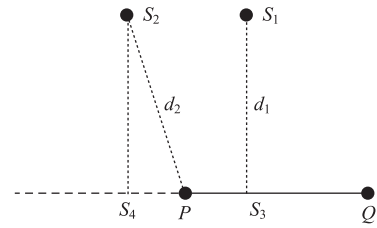


图3 最短距离的计算

Fig. 3 Calculating the shortest distance

(1) 定位点 S_1 到路段 PQ 的最短距离为 d_1 , 计算公式如式 (9)^[30]:

$$d_1 = \frac{|(y_2 - y_1)x + (x_1 - x_2)y + (y_1x_2 - y_2x_1)|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (9)$$

(2) 定位点 S_2 到路段 PQ 的投影在路段 PQ 的延长线上, 所以 S_2 到路段 PQ 的最短距离为 d_2 , 计算公式为:

$$d_2 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (10)$$

假设根据网格索引和误差圆的计算, 我们所获取的候选道路集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, 那么距离的概率 $\theta_1(R_i)$ 构造计算见式 (11) 和 (12)。

$$\alpha_i = \frac{a'}{d_i}, \quad (11)$$

$$\theta_1(R_i) = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \quad (12)$$

(2) 车辆道路夹角概率构造

根据车载导航终端设备采集的定位信息中,车辆的方向角也是进行精准路网匹配的一个重要参数,假设车辆方向与道路方向的夹角为 θ_i ,如图 4 所示。

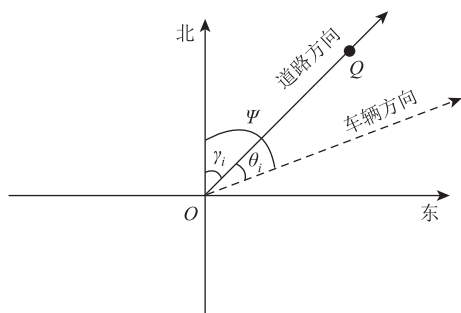


图 4 车辆与道路的夹角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of angle between vehicle driving direction and road direction

其中,假设 Q 点的坐标为 (x, y) , O 为坐标原点,坐标为 $(0, 0)$,那么路段 OQ 与正北方向的夹角 γ_i 可以根据式 (13)^[11] 进行计算:

$$\gamma_i = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \arctan(\frac{y}{x}), & x > 0 \\ \frac{3\pi}{2} - \arctan(\frac{y}{x}), & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

如果 $x=0, y<0$,那么 $\gamma_i=\pi$,如果 $x=0, y>0$,那么 $\gamma_i=0$,因此可以推导出 θ_i 的计算如式 (14) 所示:

$$\theta_i = \begin{cases} |\psi - \gamma_i|, & |\psi - \gamma_i| < 180^\circ \\ 360^\circ - |\psi - \gamma_i|, & |\psi - \gamma_i| > 180^\circ \end{cases} \quad (14)$$

假设从误差圆中获取的候选道路集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n \mid i=1, 2, \dots, n\}$,那么方向角的概率构造公式如式 (15) ~ (16) 所示:

$$\lambda_i = \frac{\pi}{\theta_i}, \quad (15)$$

$$p_2(R_i) = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (16)$$

1.3.2 候选路段概率计算

本研究的对象为交叉路段下的地图匹配,计算了距离和方向角的分配概率之后,我们采用自适应权重的方式将两种影响因素进行结合,计算候选路段的概率。计算公式见式 (17):

$$p_0 = \mu_1 p_1 p_2 + \mu_2 p_1 p_2 + \mu_3 p_1 p_2 + \mu_4 p_1 p_2, \quad (17)$$

式中依次分为距离和方向都能匹配到道路 R_i 的概率,根据距离匹配到路段的概率,根据方向匹配到路段的概率,根据距离和方向都没有匹配到路段的概率。

1.3.3 算法的步骤和流程图

算法的具体实现步骤如下。

步骤 1: 对车辆定位异常信息进行剔除,对 OSM 地图进行补全,对电子地图进行网格划分。

步骤 2: 获取候选匹配道路集合。

步骤 3: 投影距离和方向的分配概率计算。

步骤 4: 根据不同道路类型,自适应确定权重参数。

步骤 5: 计算候选匹配道路的概率。

算法的流程图如图 5 所示。

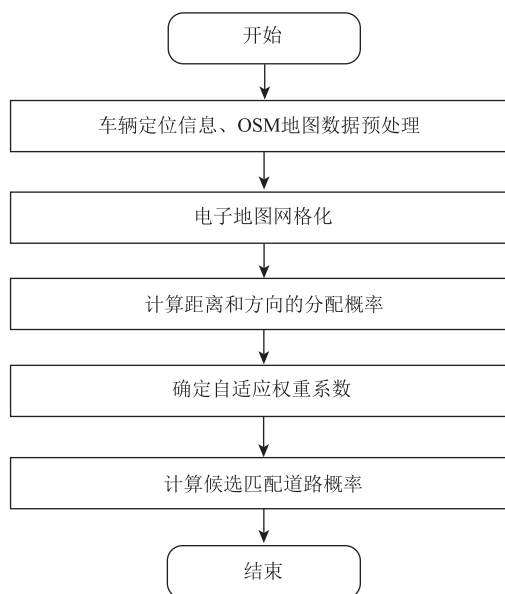


图 5 投影距离的自适应地图匹配算法流程

Fig. 5 Flowchart of adaptive map matching algorithm for projection distance

2 算法的试验验证及仿真比较

2.1 算法的试验验证

为了验证自适应投影地图匹配算法性能,采用 1 800 多辆常州市出租车中采集的实时定位信息对算法进行实试验证。车辆的定位信息通过车载导航终端获取,包括车辆的经纬度、车辆速度、方向角等。采样时间间隔为 10 s。主要在交叉路段的情景下进行实测,图 6 为车辆在某一块区域的匹配结果,由图可以看出,在复杂的交叉路段背景下,车辆的每一个定位点都能很好地匹配到道路上,具有极高的

匹配准确率。



图6 车辆实测匹配轨迹

Fig. 6 Measured matching trajectory of vehicles

2.2 算法结果分析

在城市复杂的交叉路段背景下,分别对自适应投影算法、传统投影算法、隐马尔科夫模型算法和曲线拟合匹配算法,这4种算法进行了匹配准确率的对比,算法准确率的计算为匹配正确的定位点与全部定位点之比。由图7可以看出,本研究算法在交叉路段的匹配准确率达98%以上,对比其他3种算法,准确率至少提高了4%,由于本研究算法在计算候选路段概率时,加大了方向角的权重参数,因此在平行路段的匹配准确率不如其他3种算法。但在组合路段的情景下,本研究算法的准确率明显优于其他3种算

法,这表明,在交叉路段和组合路段下,本研究算法的匹配准确率最高,尤其适用于城市复杂的交叉路段。

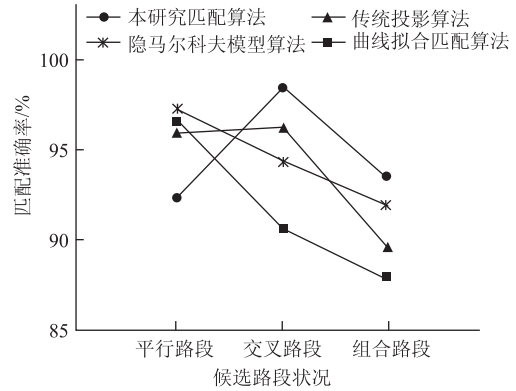


图7 匹配准确率对比

Fig. 7 Comparison of matching accuracies

对匹配算法的评价,除了计算4种不同算法的匹配准确率之外,还分别计算了4种算法的单点匹配时间,单点匹配时间是指将待匹配点匹配到确定路段所用的平均时间,图8显示的是4种算法分别在2,3,4,5条候选道路下的匹配时间,由图可以得出,当候选道路为2条时,本研究所提出的算法匹配时间为3.8 ms,当候选道路为5条时,匹配

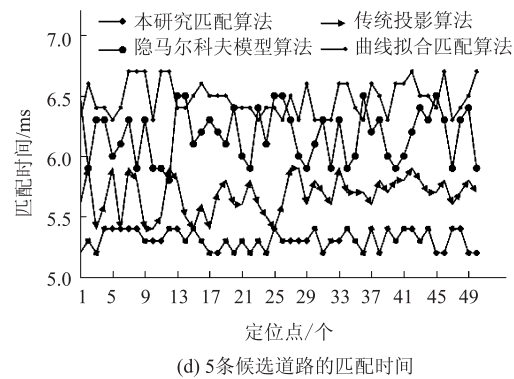
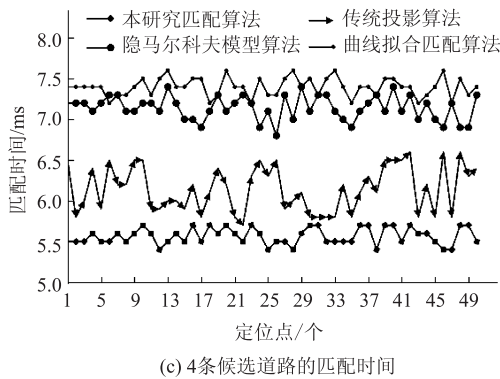
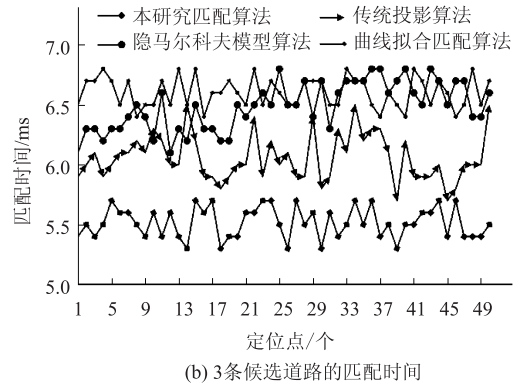
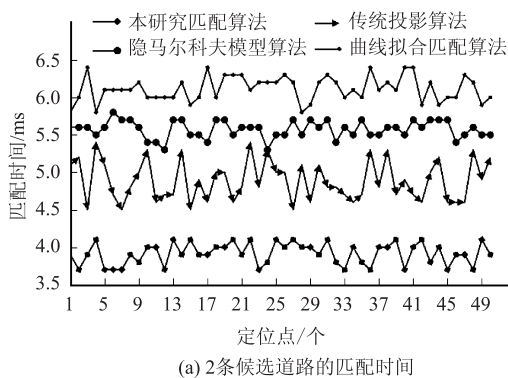


图8 不同算法对应的单点匹配时间

Fig. 8 Single point matching time of different algorithms

时间约为 5.5 ms, 随着候选道路的增加, 4 种算法的单点匹配时间均有所增加, 但是, 本研究提出的算法匹配时间均低于其他 3 种算法, 其单点匹配时间大约可以降低 1.5 ms 左右, 具有较好的实时性。

3 结论

本研究以城市交叉路段的地图匹配为研究对象, 提出交叉路段背景下的自适应投影地图匹配算法, 通过距离阈值方法剔除定位异常点, 并且通过与高德地图进行对比, 补全开放街道地图缺失的道路信息, 对开放街图地图进行网络划分, 生成网格索引, 结合误差圆的计算确定候选道路集合, 提高了地图匹配速度, 分别计算投影距离和方向角的分配概率, 自适应调整权重系数, 对候选道路的概率进行计算, 选出最优匹配路段。通过进行试验验证, 得出的结论如下:

(1) 利用设定距离最大值的方法, 去除异常定位点, 对采集到的车辆定位信息进行预处理, 同时通过将 OSM 地图与高德地图进行对比, 对 OSM 地图缺失的道路进行信息补全, 为后续的地图匹配算法提供了精准的原始数据信息, 是决定地图匹配准确度非常关键及重要的过程。

(2) 通过对城市的 OSM 电子地图生成网格索引, 以及计算误差椭圆的方法, 确定候选道路所在的大致区域, 可以提高候选道路集的查询效率, 大大减少了地图匹配的计算时间。

(3) 通过对常州市出租车车辆实时行驶数据进行试验验证以及算法的仿真比较, 本研究提出的自适应投影地图匹配算法, 与其他 3 种地图匹配算法相比, 虽然在平行道路下, 匹配准确率有所下降, 但是在交叉道路背景下, 匹配准确率提高了 4% 左右, 很好地解决了交叉路段背景下的地图匹配难的问题。

(4) 与其他 3 种地图匹配算法相比, 通过分别对 2, 3, 4, 5 条候选道路情况下的单点匹配时间进行计算, 计算结果表明, 自适应的投影地图匹配算法, 在多条候选道路的情况下, 单点匹配时间缩短了 1.5 ms 左右, 提高了算法性能, 实现了交叉路段背景下的快速地图匹配。

本研究的对象是城市交叉道路背景下的地图匹配算法及应用, 由于城市道路网络的复杂性, 城市道路网络还包含大量的高架路, 立交桥等, 下一阶段的研究内容将为研究如何对车辆在高架路或者立

交桥进行精准的定位, 实现复杂路网下的高精度地图匹配, 提高路网匹配算法的性能。

参考文献:

References:

- [1] REN M, KARIMI H A. A Hidden Markov Model-based Map-matching Algorithm for Wheel Chair Navigation [J]. Journal of Navigation, 2009, 62 (3): 383-395.
- [2] LOU Y, ZHANG C, ZHENG Y, et al. Map-matching for Low-sampling-rate GPS Trajectories [C] //Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Seattle: ACM, 2009: 352-361.
- [3] WHITE C E, BERNSTEIN D, KORNHAUSER A L. Some Map Matching Algorithms for Personal Navigation Assistants [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2000, 8 (1/2/3/4/5/6): 91-108.
- [4] QUDDUS M, OCHIENG W Y, ZHAO L, et al. A General Map Matching Algorithm for Transport Telematics Applications [J]. GPS Solutions, 2003, 7 (3): 157-167.
- [5] BRAKATSOULAS S, PFOSE D, SALAS R, et al. On Map-matching Vehicle Tracking Data [C] //Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases. Trondheim, Norway: VLDB Endowment, 2005: 853-864.
- [6] SCHÜSSLER N, AXHAUSEN K W. Map Matching of GPS Traces on High-resolution Navigation Networks Using the Multiple Hypothesis Technique (MHT), Working Paper 568 [R]. Zurich: Institute for Transport Planning and System (IVT), 2009.
- [7] VITERBI A J. Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm [C] //The Foundations of The Digital Wireless World. Singapore: World Scientific Publishing Co., Pte. Ltd., 2009: 41-50.
- [8] MOHAMED R, ALY H, YOUSSEF M. Accurate Real-time Map Matching for Challenging Environments [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18 (4): 847-857.
- [9] HOU X T, LUO L B, CAI W T, et al. Fast Online Map Matching for Recovering Travelling Routes from Low-sampling GPS Data [C] // 2018 IEEE Smart World, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation. Guangzhou: IEEE,

- 2018; 917-924.
- [10] TANG J J, ZHANG S, ZOU Y J, et al. An Adaptive Map-matching Algorithm Based on Hierarchical Fuzzy System from Vehicular GPS Data [J]. *PloS One*, 2017, 12 (12): 262-265.
- [11] 滕志军, 曲兆强, 侯学艳, 等. 基于曲线拟合与拓扑结构的地图匹配算法 [J]. *计算机工程*, 2018, 44 (8): 291-295.
- TENG Zhi-jun, QU Zhao-qiang, HOU Xue-yan, et al. Algorithm of Map Matching Based on Curve Fitting and Topological Structure [J]. *Computer Engineering*, 2018, 44 (8): 291-295.
- [12] 刘旻, 李梅, 徐晓宇, 等. 一种基于 HMM 模型改进的地图匹配算法 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2018, 54 (6): 1235-1241.
- LIU Min, LI Mei, XU Xiao-yu, et al. An Improved Map Matching Algorithm Based on HMM Model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54 (6): 1235-1241.
- [13] 吴刚, 邱煜晶, 王国仁. 基于隐马尔可夫模型和遗传算法的地图匹配算法 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2017, 38 (4): 472-475.
- WU Gang, QIU Yu-jing, WANG Guo-ren. Map Matching Algorithm Based on Hidden Markov Model and Genetic Algorithm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2017, 38 (4): 472-475.
- [14] 谢金运, 涂伟, 李清泉, 等. 大规模浮动车流数据并行地图匹配方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2017, 42 (5): 697-703.
- XIE Jin-yun, TU Wei, LI Qing-quan, et al. A Parallel Map-matching Approach for Large Volume Floating Car Stream Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42 (5): 697-703.
- [15] HSUEH Y L, CHEN H C. Map Matching for Low-sampling-rate GPS Trajectories by Exploring Real-time Moving Directions [J]. *Information Sciences*, 2018, 433-434: 55-69.
- [16] 陈菲, 邹涛, 王伦. 改进的基于投影的地图匹配算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (31): 242-244, 248.
- CHEN Fei, ZOU Tao, WANG Lun. Improved Projection-based Map Matching Algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47 (31): 242-244, 248.
- [17] ZHANG Y P, FU C Y, HU L W. Yellow Light Dilemma Zone Researches: A Review [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1 (5): 338-352.
- [18] 朱顺应, 蒋若曦, 王红, 等. 机动车交通冲突技术研究综述 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33 (2): 15-33.
- ZHU Shun-ying, JIANG Ruo-xi, WANG Hong, et al. Review of Research on Traffic Conflict Techniques [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33 (2): 15-33.
- [19] LAURESHYNA A, CEUNYNCK T D, KARLSSON C, et al. In Search of the Severity Dimension of Traffic Events: Extended Delta-V as a Traffic Conflict Indicators [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 98: 46-56.
- [20] ZHANG K, ZHANG L, YANG M H, et al. Fast Tracking via Spatio-temporal Context Learning [J]. *Computer Science*, 2013 (1): 127-144.
- [21] LI M, WANG X H, SHI K. Traffic Conflict Identification Technology of Vehicle Intersection Based on Vehicle Video Trajectory Extraction [J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 109: 963-968.
- [22] HO T D, GROTLI E I, SUJIT P B, et al. Optimization of Wireless Sensor Network and UAV Data Acquisition [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 78 (1): 159-179.
- [23] XING L, HE J, ABDEL-ATY M, et al. Examining Traffic Conflicts of Up Stream Toll Plaza Area Using Vehicles' Trajectory Data [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 125: 174-187.
- [24] LU G, YAN J, KOU Y, et al. Image Registration Based on Criteria of Feature Point Pair Mutual Information [J]. *IET Image Processing*, 2011, 5 (6): 560-566.
- [25] FU X S, ZHU J. Research on Moving Vehicle Detection and Tracking Algorithm Based on Video Image [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 467-469: 1488-1492.
- [26] LI M, WANG X H, SHI K. Traffic Conflict Identification Technology of Vehicle Intersection Based on Vehicle Video Trajectory Extraction [J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 109: 963-968.
- [27] LIU Y, CHANG G L, TAO R, et al. Empirical Observations of Dynamic Dilemma Zones at Signalized Intersections [J]. *Transportation Research Record*, 2006, 2035: 122-133.
- [28] LU G, CHENG B, KUZUMAKI S, et al. Relationship between Road Traffic Accidents and Conflicts Recorded by Drive Recorders [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2011, 12 (4): 320-326.
- [29] 曲大义, 韩乐滩, 林璐, 等. 面向交叉口主动安全的车路协同辅助决策系统设计 [J]. *公路交通科技*, 2021, 38 (5): 100-108, 122.
- QU Da-yi, HAN Le-wei, LIN Lu, et al. Design of Vehicle-road Cooperative Auxiliary Decision-making

- System for Active Safety at Intersections [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (5): 100-108, 122.
- [30] 滕志军, 曲兆强, 何义昌, 等. 基于初始位置的高速公路快速地图匹配算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25 (4): 461-465, 472.
- TENG Zhi-jun, QU Zhao-qiang, HE Yi-chang, et al. Fast Map-matching Algorithm for Highway Based on Initial Position [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25 (4): 461-465, 472.
- [31] 赵笑月, 汪攀, 朱顺应, 等. 基于视频识别的互通合流区交通冲突空间分布 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (5): 90-99.
- ZHAO Xiao-yue, WANG Pan, ZHU Shun-ying, et al. Spatial Distribution of Traffic Conflicts in Interchange Merging Area Based on Video Recognition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (5): 90-99.
- [32] 王东柱, 宋向辉, 朱书善, 等. 基于车路协同的高速公路合流区安全预警控制方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (增 1): 50-56, 63.
- WANG Dong-zhu, SONG Xiang-hui, ZHU Shu-shan, et al. Merging Assistance Method Based on Vehicle-infrastructure Cooperative Technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (S1): 50-56, 63.
- [33] 朱递, 刘瑜. 一种路网拓扑约束下的增量型地图匹配算法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42 (1): 77-83.
- ZHU Di, LIU Yu. An Incremental Map-matching Method Based on Road Network Topology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42 (1): 77-83.
- [34] MOHAMED R, ALY H, YOUSSEF M. Accurate Real-time Map Matching for Challenging Environments [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18 (4): 847-857.
- [35] LING Y, LI D, HU S. A Map-matching Algorithm with Low-frequency Floating Car Data based on Matching Path [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018 (1): 146-152.
- [36] BLAZQUEZ C, RIES J, MIRANDA P A, et al. An Instance Specific Parameter Tuning Approach Using Fuzzy Logic for a Post-processing Topological Map-matching Algorithm [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018, 14 (2): 136-141.
- [37] SUN Z, YANG D. D2D Radio Resource Allocation Algorithm Based on Global Fairness [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39 (1): 81-87.