

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

第41期PRP研究论文

THE 41st RESEARCH PAPER



项目名称：2022Google定位技术全球挑战赛：面向手机
的高精度卫星导航定位技术

学生姓名：王之超
学生学号：520021911313
专 业：航空航天工程
指导教师：陈新
学院(系)：航空航天学院



2022Google定位技术全球挑战赛：面向手机的高精度卫星 导航定位技术

摘 要

设备定位由于各种因素，包括大型建筑、桥梁、用户密度、电磁干扰等，目前仍只能保证3-5米的定位精度，而提升定位精度至1米以内，乃至厘米级，一直是近期国内外热门研究领域。本项目依托2022Google定位技术全球挑战赛，利用挑战赛所提供的各类数据进行测试与实践，并最终提交成果参加比赛。本文主要研究这个精度提升环节中有关路网匹配的部分。在简单阐述路网匹配的基本理念与当前主流算法后，基于此提出了针对本项目的三种算法构想，包括隐马尔科夫模型算法、拓扑关系算法和几何匹配算法。经过一系列尝试的测试，最终制定了以几何匹配算法为主的研究方案。本文在已知高精度地图定位的条件下，探究了如何进行路段分离的问题，以及如何利用高精度道路数据对各类误差点进行匹配的算法。通过使用加权平均、垂直方向平移以及方向检测的方法，提高了匹配的精准度，减小了漏匹配、错误匹配的问题，提高了最终定位精度。最终在挑战赛环节，通过对实际应用场景下定位数据的匹配，验证了该算法的可行性和有效性，也体现出了精度的提升和应用优势。

关键词：路网匹配，几何匹配算法，定位技术



Precise Satellite Navigation and Positioning Technology for Mobile Phones

ABSTRACT

Due to various factors, including large buildings, bridges, user density, electromagnetic interference, etc., equipment positioning can still only guarantee the positioning accuracy of 3-5 meters, and improving the positioning accuracy to within 1 meter or even centimetre level has been a recent domestic trend. Foreign popular research areas. This project relies on the 2022 Google Positioning Technology Global Challenge, uses all kinds of data provided by the challenge for testing and practice, and finally submits the results to participate in the competition. This paper mainly studies the part of the road network matching in this accuracy improvement link. After briefly expounding the basic concept of road network matching and the current mainstream algorithms, three algorithm concepts for this project are proposed based on this, including the hidden Markov model algorithm, topological relationship algorithm and geometric matching algorithm. After a series of attempts and tests, a research plan based on geometric matching algorithms was finally formulated. Under the condition of known high-precision map positioning, this paper explores the problem of how to separate road segments, and how to use high-precision road data to match various error points. By using the methods of weighted average, vertical translation and direction detection, the matching accuracy is improved, the problems of missing matching and wrong matching are reduced, and the final positioning accuracy is improved. Finally, in the challenge session, the feasibility and effectiveness of the algorithm were verified by matching the positioning data in the actual application scenario, and it also reflected the improvement of accuracy and application advantages.

Key words: Map matching algorithms, geometric matching algorithm, positioning technology



目 录

第一章 绪论.....	6
1.1 课程研究背景及意义.....	6
1.2 概念介绍与研究综述.....	6
1.2.1 路网匹配概念.....	6
1.2.2 路网数据.....	6
1.2.3 数据预处理方法.....	7
1.2.4 路网匹配算法.....	7
1.3 本文的主要工作内容.....	8
第二章 算法选择	9
2.1 算法方案介绍	9
2.1.1 隐马尔科夫模型算法方案.....	9
2.1.2 拓扑匹配算法方案.....	10
2.1.3 几何匹配算法方案.....	10
2.2 算法方案筛选	10
2.2.1 道路分段.....	10
2.2.2 几何匹配算法.....	12
第三章 研究过程及结果	14
3.1 几何匹配算法实现过程	14
3.1.1 算法测试.....	14
3.1.2 算法修正.....	15
3.2 算法应用及结果	15
第四章 总结与展望.....	17
4.1 总结.....	17
4.2 展望.....	17
参考文献.....	18
致 谢.....	18



插图索引

图 1 - 1	地图提取道路数据结果 ^[2]	7
图 2 - 1	地图提取道路数据结果 ^[1]	9
图 2 - 2	直线道路双车道路段分离	11
图 2 - 3	复杂道路路段分离	11
图 2 - 4	道路密集地区路段分离	12
图 2 - 5	圆环形匝道	12
图 2 - 6	几何匹配算法示意图	13
图 3 - 1	原始误差分布	14
图 3 - 2	匹配后误差分布	14
图 3 - 3	修正后算法匹配误差分布	15
图 3 - 4	应用与效果展示（1）	16
图 3 - 5	应用与效果展示（2）	16



第一章 绪论

1.1 课程研究背景及意义

通过GNSS 芯片组提供的由多个定位卫星采集的原始测量值，经算法解析，可用于计算智能手机的位置。然而，当前的手机只能提供3-5米的定位精度，对于高级应用场景，结果不够精细也不可靠。其中，城市障碍物，包括大型建筑、桥梁、用户密度、电磁干扰等，是GPS 准确性的最大障碍。在这样的场景中，常见有定位偏移，进而导致路径规划错误，为用户带来极大的不便。

近年来，手机用户对高精度位置服务需求激增，而目前 Google公司 Android操作系统已开放GNSS原始观测值接口，使传统适用于专业设备的PPP、RTK等高精度定位成为可能。

在这个项目中，我们将对智能手机GNSS原始观测数据进行解析，研究多系统多频点任意组合的高精度导航定位方法，提供更精确的时间信息和空间信息。依托Google挑战赛，此挑战中的数据包括在开放天空和轻型城市道路上收集的定位数据，这些高速公路和主要街道是使用最广泛的道路，也最能考验智能手机定位的极限。通过对挑战赛GNSS原始观测数据进行处理，不断提高结果的准确性。

本项目在对GNSS数据处理的同时，一方面能增强对各类定位算法的理解，为学习、掌握定位算法提供实践平台，另一方面也能将相关研究概念、研究思路及成果推广开来，为日后相关领域的研究，乃至任何牵涉到全局定位和局部定位的研究与实验，打下基础，积累经验。

1.2 概念介绍与研究综述

关于定位算法和定位精度的研究已经成为国内外的相关热点研究领域，在本次项目中，本文作者主要负责定位算法及修正中路网匹配的部分，因此本节将主要介绍路网匹配相关内容。

1.2.1 路网匹配概念

高文超等人（2018）^[1]总结将路网匹配总结为“路网匹配是基于位置服务中的关键预处理步骤，它将GPS 轨迹点匹配到实际路网上。以此为基础对数据进行分析和挖掘，能够辅助解决城市计算中相关问题”。其算法的本质，是将一个经纬坐标转换为另一个经纬坐标，而后者相较前者更贴近实际道路，在理想状态下，与实际位置的误差将更小。

路网匹配对数据有较高要求，其中必需的包括高精度道路数据（称为路网数据）和处理过的精度较好的定位数据（成为预处理数据）。

在本项目中，路网匹配的介入是在对GNSS原始数据处理完毕之后，通过将道路数据与定位点数据进行比对，进一步修正偏差，以达到对计算结果的二次优化，再一步提升定位精度。

1.2.2 路网数据

在本项目中，道路数据基本由挑战赛所给数据集提供。此外，多项研究也提供了在路网数据缺失的情况下获取高精度路网数据的方法。Ding Bin等（1998）^[2]提出了一种通过机器视觉的方法提取电子地图中的道路特征生成高精度的路网数据，在文章中他们以一张新加坡局部地图为测试，通过特征提取以及噪声清除（包括对建筑物及非车行道的清除），



成功生成了一张高精度路网。



图 1-1 地图提取道路数据结果^[2]

Figure 1-1 Results of the extraction of road data from the map

Wang Yilun等（2014）^[3]则提出通过张量分解的方法，在已知部分道路数据的情况下，推算出缺失部分的道路数据。该方法基于张量的非零条目，将张量分解为几个（低秩）矩阵和一个核心张量（或几个向量）的乘积，以此通过若干已知道路计算未知道路数据。

1.2.3 数据预处理方法

高强等（2016）^[4]指出，原始定位数据的特点在于异频采样性和数据质量差，这两点特性决定了无法将原始数据直接应用于路网匹配，前者造成数据分布的均匀，而后者造成了数据离散，都为匹配造成了一定困难。

轨迹数据的预处理方法主要包括数据清洗、轨迹压缩、轨迹分段等方法。

数据清洗包括噪音滤波和停留点检测两类，Lee 等人^[5]详细地介绍了卡尔曼滤波在轨迹数据预处理中的应用，这种算法包含了测量模型与动态模型，可以包含更多的状态向量例如速度；停留点检测一方面可以挖掘用户潜在兴趣，同时由于停留点会造成大量重复数据点，通过检测停留点也可以精简数据量，简化后续工作。

轨迹压缩主要用于缩小存储空间，与本项目研究相关性不大，在此不做过多叙述。

轨迹分段主要用于以时间节点对定位数据做分段切分，以提取轨迹特征，在本研究中，定位数据已经做过分段处理，因此这一部分也不在考虑范围内。

1.2.4 路网匹配算法

路网匹配算法种类多样，根据内容可主要分为四类：几何匹配算法、拓扑关系算法、概率统计算法和先进匹配算法。

其中，以几何匹配算法实现难度最低，常常基于点对点及点对线匹配，但易受异常值影响；拓扑关系算法基于路网拓扑关系进行匹配，但容易受到采集噪声和数据稀疏性的影响；概率匹配算法通过置信区间和评分机制大幅减小了异常值影响，但也导致匹配速度大幅减慢；先进匹配算法在算法理念上更为先进，但计算开销较大，缺乏理论依据，也缺少初始匹配方法，在很大程度上影响了随后匹配的性能。

本项目最后所使用的路网匹配算法基本基于几何匹配算法，事实上，在本项目研究初期，



对算法的选用做过多种构想与尝试，相关内容将在下一章做详细介绍。

1.3 本文的主要工作内容

本文的组织结构主要如下：第一章介绍课题研究背景、相关概念和研究现状；第二章介绍本项目研究初期所构想的若干算法方案，并给出方案筛选过程和最终选择；第三章介绍基于几何算法匹配的方法，并通过一系列算法修正，最后可实现的效果以及最终的应用；第四章对本项目的结论进行相关的讨论。

本文的主要贡献如下：基于对路网匹配算法和本项目应用场景的分析，提出了一套基于高精度路网数据的应用几何和拓扑关系进行路网匹配的方案，并实现了该方案在挑战赛中的应用。

第二章 算法选择

2.1 算法方案介绍

2.1.1 隐马尔科夫模型算法方案

最早利用隐马尔科夫模型来进行路网匹配的应用来自 Lamb 等人^[6]的工作，在实现过程中，隐马尔科夫模型主要包含 5 个要素——2 个状态集合和 3 个概率矩阵，具体如下：

1. 隐含状态 S : 马尔可夫模型中实际所隐含的状态,通常无法通过直接观测得到.这些状态之间满足马尔可夫性质.令 N 代表隐含状态数目.
2. 可观测状态 O : 可以通过直接观测而得到的状态,在隐马尔可夫模型中与隐含状态相关联.令 M 代表可观测状态数目.
3. 状态转移概率矩阵 A : 描述隐马尔可夫模型中各个状态之间的转移率. $A=[a_{ij}]N \times N$,其中, $a_{ij}=P(q_{t+1}=S_j|q_t=S_i), 1 \leq i, j \leq N$.表示在 t 时刻状态是 S_i 的条件下,在 $t+1$ 时刻状态为 S_j 的概率.
4. 观测状态概率矩阵 B : $B=[b_j(k)]N \times M$,其中, $b_j(k)=P(o_t=O_k|q_t=S_j), 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq M$.表示在 t 时刻隐含状态是 S_j 条件下,其可观测状态为 O_k 的概率.
5. 初始状态概率矩阵 π : $\pi=(\pi_i), \pi_i=P(q_1=S_i), 1 \leq i \leq N$.表示隐含状态在初始时刻 $t=1$ 的概率矩阵

具体的实现过程在文献[1]中做了详细描述，在基于隐马尔科夫模型的路网匹配算法中，对于每一个 GPS 轨迹点，首先确定一组候选路段。每个候选路段被表示为马尔可夫链中的 S (顶点)，并赋值一个 B ，这是观察 GPS 点是否与候选路段匹配的可能。GPS 点越接近某一路段，则其 B 值就越高。然后，为马尔可夫链中连接每一对相邻顶点的边计算 A 值。最终，在马尔可夫链上找到具有最大 A 值和 B 值的最大似然路径。在这一过程，一般使用维特比算法 (Viterbi algorithm) 进行求解，实际上是用一个动态规划(dynamic programming, 简称 DP) 算法解隐马尔可夫模型预测问题，即用动态规划在道路网络中快速找到使 $A \times B$ 最大化的最优路径。这个过程如图 2-1 所示。

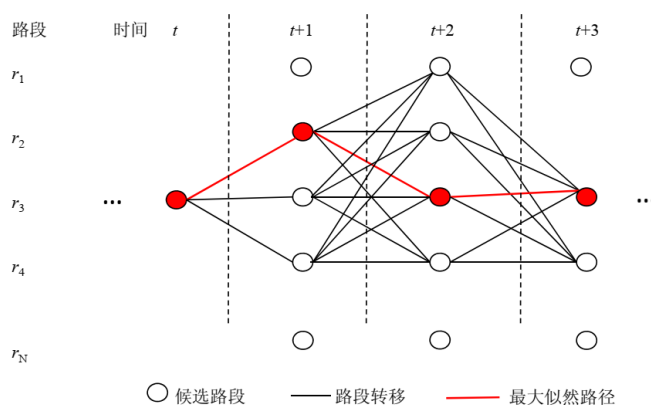


图 2-1 地图提取道路数据结果^[1]

Figure 2-1 Results of the extraction of road data from the map

在本项目研究中，则要求首先要将已有的道路数据进行分段，然后给出计算 A 值和 B 值的相关算法，并使用迭代的方法得到最大似然路径。



2.1.2 拓扑匹配算法方案^[7]

考虑到路网具有非常鲜明的拓扑特征，并且在实际情况中轨迹应基本严格遵循路网结构，因此使用拓扑特征进行匹配也是一种极具潜力的方法。在具体实现上较为简单，需要对道路轨迹方向、GPS点到道路的距离以及相关性等进行加权计算得到该路段的总权重，然后选择权重最大的路段为匹配路段。

在本项目研究中，则要求首先要将已有的道路数据进行分段，将各个路段分开保存，同时提取道路起点、终点、方向等信息，考虑到高精度定位中，区分双向车道扮演着重要角色，因此保存上述信息至关重要。通过对GPS定位点的位置、到道路距离及运动方向，寻找匹配度最高的路段，以完成匹配。

2.1.3 几何匹配算法方案

在本项目研究中，GNSS原始数据的处理方法较成熟，处理后的数据精度较好，异常值较少，几何匹配算法中的劣势可以被规避，进而其实现难度低的优势可以被更好发挥，因此几何匹配算法也是本研究构想的方案之一。

具体实现上，只需计算GPS坐标点到附近道路或道路数据点的距离，通过垂直平移或平均算法修改GPS坐标值，即可完成匹配。

2.2 算法方案筛选

针对上述的三个算法方案，利用挑战赛所提供的数据集，进行了不同尝试，现将结果展示如下。

2.2.1 道路分段

隐马尔科夫模型算法方案和拓扑匹配算法方案都要求对路网做精度较高的分段。在挑战赛提供的数据中，ground truth数据作为测试集提供，精度高误差小，可被视作道路数据点。其中，每一条GPS数据都包含了定位点的经纬度坐标及速度数据，前者可提供位置信息，而后者可提供方向信息。根据数据特征，道路分段所使用的算法如下：

Step 1: 读取整体ground truth中GPS数据点，通过坐标及速度清楚重复点、停留点，节省运算量；

Step 2: 读取1个ground truth中GPS数据点坐标及速度，标记为道路起点；

Step 3: 读取下一个GPS数据点坐标及速度，若其方向与上一点方向偏差大于等于 90° ，则认为道路结束，将该点标记为道路终点，以起点终点连线计算道路方向，保存道路数据，返回Step 2；若其方向与上一点方向偏差小于 90° ，则认为该点与上一点同属一个路段，重复Step 3。

结果显示，在直线道路上，能有效区分双车道路段，为精确匹配提供了可能，如图2-2所示，橙色与蓝色分别显示了同一条道路上双向车道的路段。

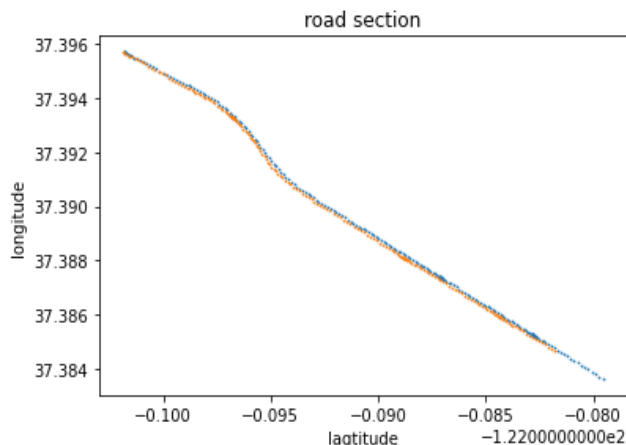


图 2-2 直线道路双车道路段分离

Figure 2-2 Straight two-lane road segment separation

在较复杂道路的条件下，同样可以达到较好的分段效果，如图2-3所示，每一种颜色即代表了一条路段。

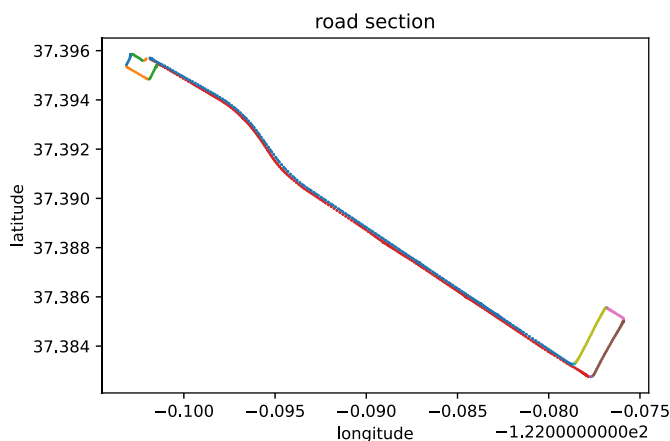


图 2-3 复杂道路路段分离

Figure 2-3 Separation of complex road sections

而在道路交叉较多的地区，该算法仍然有效，由于判断路段的标准是基于转向，在转弯处可能会分离出额外的路段，但并不影响实际匹配。如图2-4所示，每一种颜色即代表了一条路段，而图注则列出了每一路段所含数据点量。可以发现，部分路段数据量仅有不足5个，这就属于额外分离出的路段。

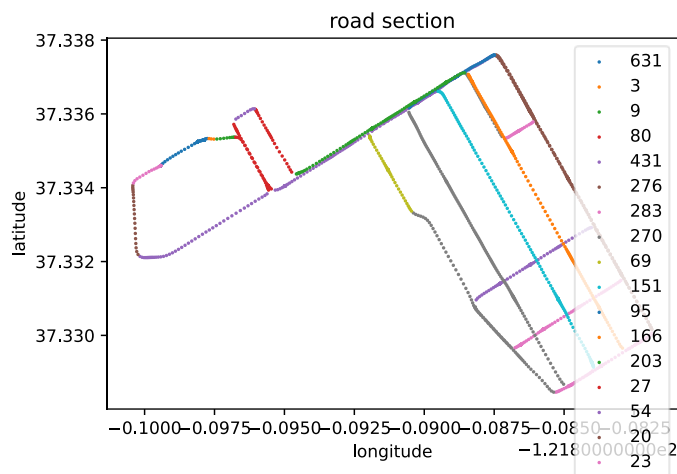


图 2-4 道路密集地区路段分离

Figure 2-4 Separation of road sections in densely populated areas

在高速路段，由于高速匝道经常会出现圆环形构造，如图2-5所示，已经立交部分也经常出现圆环形道路，路段分离的问题较为严重，在这种算法下，会将这些圆环形道路分割为大量的路段，而每个路段仅含有几个数据点，会导致匹配过程中出现大量非常接近的路段，影响匹配速度和最终精度。



图 2-5 圆环形匝道

Figure 2-5 Circular ramp

基于上述考量，道路分段的方法尚不稳定，因此没有采用隐马尔科夫模型算法方案和拓扑匹配算法方案。但这一思路并未被完全放弃，在最终的算法中，仍然利用到了这一部分做出的思考和成果。

2.2.2 几何匹配算法

本研究中所设计的几何匹配算法如图2-6所示。

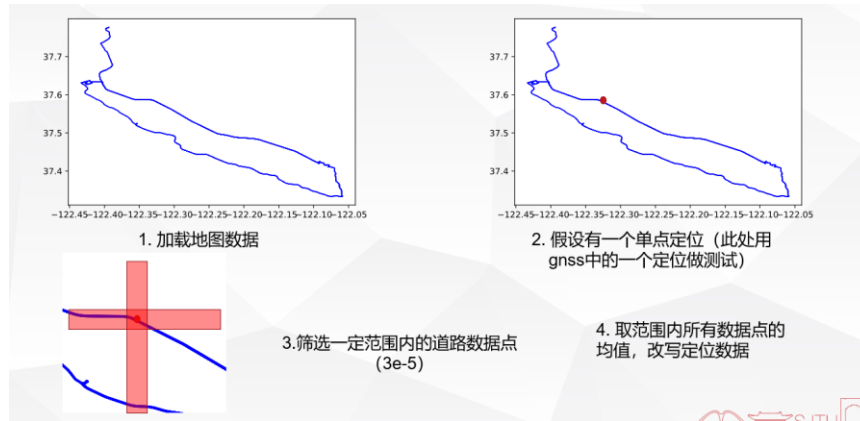


图 2-6 几何匹配算法示意图

Figure 2-6 Schematic Diagram of Geometric Matching Algorithm

Step 1: 加载由ground truth中GPS数据点构成的地图数据（不做路段分离，将所有数据保存为一个地图数据）

Step 2: 读取GNSS数据点；

Step 3: 根据期望误差范围，转换为经纬度坐标范围，筛选范围内的地图道路数据点；

Step 4: 对筛选到的道路数据点取均值，改写定位数据。

上述算法实现难度低，可靠性好，因此最终选择该方案为本项目最终的算法方案。



第三章 研究过程及结果

3.1 几何匹配算法实现过程

3.1.1 算法测试

依据2.2.2中设计的几何匹配算法，对一个由3362条GNSS定位数据构成的测试集进行测试。根据测试集与训练集一一对应的关系，在匹配前计算得出匹配前误差中位数水平1.64，95分位数水平为6.99。在3362条定位数据中，有450条定位在期望误差范围内没有筛选到道路数据，即其定位偏差大于期望误差。如图3-1所示，展示了每一条GNSS定位数据的原始误差，其中标红的数据点即为偏差大于期望误差点定位数据。

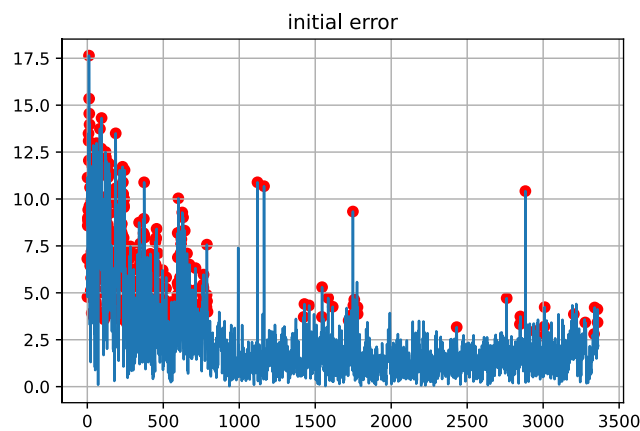


图 3-1 原始误差分布

Figure 3-1 Initial error distribution

在经过2.2.2设计的匹配算法后，误差中位数水平有了显著下降，仅有0.75，然而由于误差较大的点缺乏可匹配的道路数据，误差未能消除，导致95分位数略微上升，达到7.04。如图3-2所示。

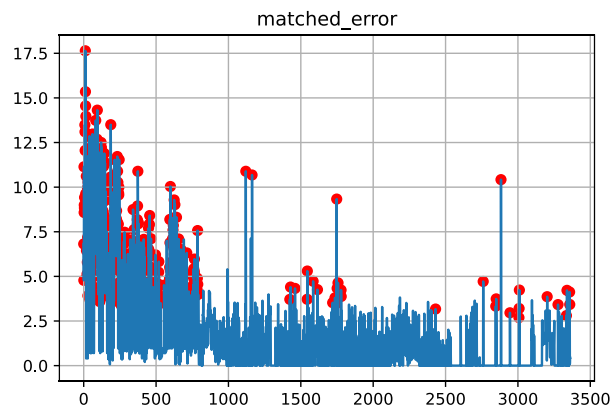


图 3-2 匹配后误差分布

Figure 3-2 Error distribution after matching



3.1.2 算法修正

依据3.1.1中的测试结果，我们认为从最大程度减小总体误差的目的和节约算力的角度出发，应当调整算法，对于误差符合期望误差的定位点（即在范围内能筛选到道路数据点）不做匹配，而集中针对误差水平高、期望误差范围内筛选不到道路数据点的定位数据（称大误差点）进行匹配。通过对图3-1中大误差点的分布，可将大误差点分为两类：

1. 孤立点，即前后两个点都不是大误差点；
2. 连续点，即前后至少有一个点也是大误差点。

对于孤立点的处理较为容易，由于其前后两个点误差都在接受范围内，因此可直接将点的坐标改写前后两个点的中点。而对于连续点序列中的每个点，则不断扩大筛选范围，直到能够筛选到若干连续的道路数据，按垂直方向向道路数据平移定位数据至道路数据之间，即完成了误差点匹配至道路上的过程。

此外，在此前拓扑关系算法方案中所应用的运用方向进行判定的思想被认为是值得参考的，在平移大误差点的时候，为保证大误差点被平移至正确的道路上，也要考量方向问题，即道路方向（通过若干连续的道路数据点算得）与定位点运动方向（通过速度参数或若干连续的定位数据点算得）需相互接近，才能保证平移方向的正确。并且，出于节省算力的考虑，每个大误差点连续序列中的最后一个点在处理时，由于其前面所有点都已经过匹配满足期望误差，而其后的点本身误差就在期望误差范围内，因此符合孤立点的定义，可以简单地按孤立点处理。

使用修正后的算法对3.1.1中提到的同一测试集再次进行匹配，误差分布如图3-3所示，可以观察到误差情况被显著改善，整体误差95分位数由匹配前的6.99下降到了6.13。

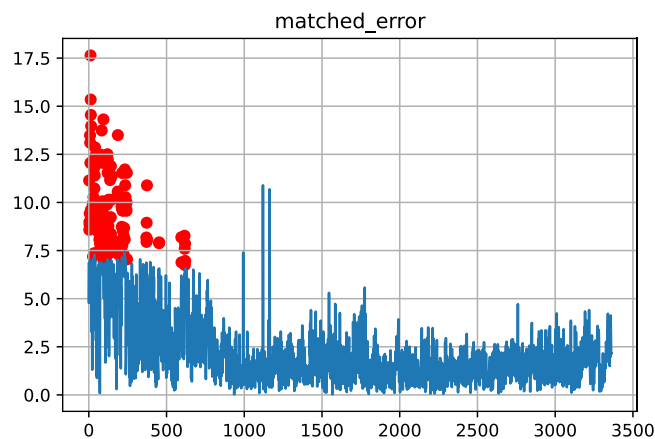


图 3-3 修正后算法匹配误差分布

Figure 3-3 Error distribution after matching with a modified algorithm

3.2 算法应用及结果

经过测试和修正后的匹配算法已经能够投入到实际应用场景中，在本项目中，主要的应



用场景即为2022Google定位技术全球挑战赛。通过为本团队算法处理过后得到的精度较高的GNSS定位数据进行进一步匹配，一定程度上帮助提高了定位精度。以下将对若干具体应用及效果进行展示。

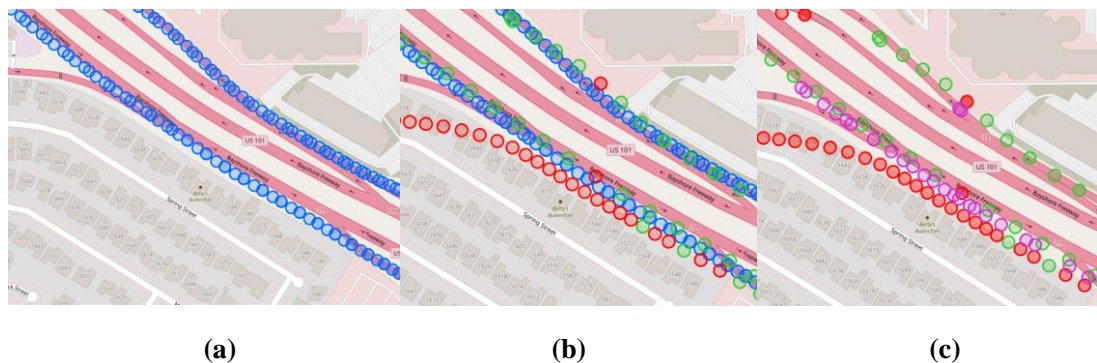


图 3-4 应用与效果展示 (1)
Figure 3-4 Display of application and effect (1)

如图3-4所示的场景中，底图为实际地图，图a中蓝色点表示道路数据点，即匹配过程中所运用到的道路数据。图b中叠加了GNSS定位数据，其中绿色点表示该定位数据误差较小，无需匹配，而红色点即表示大误差点，等待匹配。图c中展示了GNSS定位数据和匹配后数据的对比，其中紫色点表示红色的大误差点在匹配后的坐标。可以发现，匹配后的紫色点与道路重合度很高，误差大幅减小。

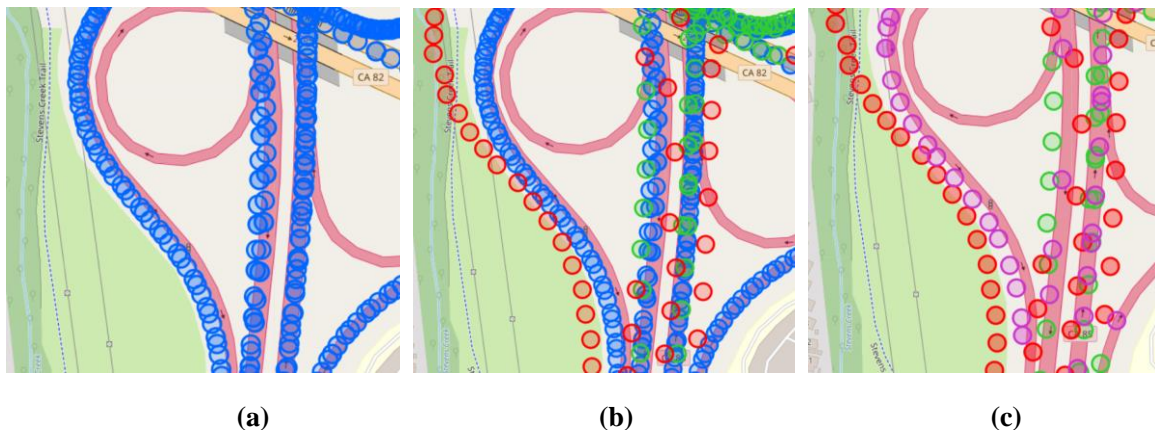


图 3-5 应用与效果展示 (2)
Figure 3-4 Display of application and effect (2)

图3-5展示了另一处道路匹配，a、b、c三图的含义与图例与图3-4相同，不再重复。值得注意的是，这一处匹配场景即为城市大型立交桥，有多处道路重叠以及圆环形匝道，在此前的构想方案中，隐马尔科夫模型算法方案及拓扑关系算法匹配方案皆因为此类场景无法良好匹配而被放弃，但从图中可以看出红色大误差点匹配后的紫色点与道路十分匹配，误差大幅降低，匹配效果良好，可以证明所采用的几何匹配算法应用效果好，具有应用优势。



第四章 总结与展望

4.1 总结

随着科技的发展，实际生活应用中对定位精度的要求越来越高，尤其在路况复杂的城市道路和行驶速度极快的高速道路上，定位的偏差可能导致难以预料的后果。在GNSS原始观测值接口，使传统适用于专业设备的PPP、RTK等高精度定位成为可能的背景下，经过算法生成更高精度的定位数据不再是遥不可及。同时，各类数字地球、数字城市项目如雨后春笋，在国内外纷纷兴起，也让高精度的地图数据有迹可循。有着前两种数据作为支撑，路网匹配得以发挥其价值，为提高定位精度，尤其是道路行车过程中的定位精度，发挥力量。

本文所作的主要工作如下：

(1) 简单地阐述了路网匹配的基本理念与当前主流算法，并基于此提出针对本项目的三种算法构想，经过一系列尝试的测试最终制定了以几何匹配算法为主的研究方案。本文研究了在已知高精度地图定位的条件下，如何进行路段分离的问题，以及如何利用高精度道路数据对各类误差点进行匹配的算法。通过使用加权平均、垂直方向平移以及方向检测的方法，提高了匹配的精准度，减小了漏匹配、错误匹配的问题，提高了最终定位精度。

(2) 通过将本文所提出的匹配算法应用于挑战赛中，一方面检验了算法的可行性和有效性，也体现出了算法在实际应用的优势，另一方面为定位数据做了精度提升，在一定程度上辅助团队提高了在挑战赛中的表现。

4.2 展望

本文基于对挑战赛所提供的数据类型、内容和精度的分析与研究，通过对本课题的研究和思考，仍有很多不足之处，有待未来更进一步的工作去解决和完善。

(1) 由于时间关系和算力限制，本项目中放弃了由路段划分出发的各种研究方案，然而这一思路在原理上是可行的，期待未来在条件足够时能够实现这些构想，也希望能达到更好的精度提升效果。

(2) 在使用几何匹配算法进行路网匹配的过程中，遇到的最大的问题仍然在于道路数据不足，既有道路数据缺失，也有道路数据精度差。同时，考虑到道路数据本身也是利用GPS设备进行采集，而采集过程中不可避免的会有采样频率不均匀，进而导致道路数据点不均匀，在道路数据点较稀疏的部分，匹配精度会被大大降低。对于这一问题，一方面可以利用在第一章中所提到的获取道路数据的各类方法，由于条件限制在本次项目中并未实践，另一方面也希望各类数字项目和组织可以公布更多的、高质量的道路坐标数据。

期待未来条件更加完善时，定位问题可以有更好的解决和更好的结果。



参考文献

- [1] 高文超,李国良,塔娜.路网匹配算法综述.软件学报,2018,29(2):225-250.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/5424.htm>
- [2] Ding Bin and Wong Kok Cheong, "A system for automatic extraction of road network from maps," Proceedings. IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems (Cat. No.98EX174), 1998, pp. 359-366, doi: 10.1109/IJSIS.1998.685476.
- [3] Wang, Yilun, Yu Zheng, and Yexiang Xue. "Travel time estimation of a path using sparse trajectories." Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. 2014.
- [4] 高强,张凤荔,王瑞锦,周帆.轨迹大数据：数据处理关键技术研究综述.软件学报.<http://www.jos.org.cn/1000-9825/0000.htm>
- [5] Lee WC, Krumm J. Trajectory Preprocessing. Computing with Spatial Trajectories. Springer New York,2011:3-33. [doi:10.1007/978-1-4614-1629-6_1]
- [6] Lamb P, Thiebaux S. Avoiding explicit map-matching in vehicle location. In: Proc. of the ITS. 1999. 8–12.
- [7] Quddus MA, Ochieng WY, Zhao L, Noland RB. A general map matching algorithm for transport telematics applications. GPS Solutions, 2003,7(3):157–167. [doi: 10.1007/s10291-003-0069-z].

致谢

首先要感谢导师陈新老师,陈老师为人谦和、学识渊博、科研态度严谨、对待学术认证负责。在课题研究过程中,陈老师严格要求,认真指导,给我提出了很多宝贵的建议。与老师的每一次交流都让我受益匪浅。感谢老师这段时间的关怀与悉心指导。

感谢我的几位同学,感谢你们平时的学习生活中对我的陪伴鼓励,以及各种精神上的支持,虽然在相处的过程中并非一帆风顺,也有过些许不快,但有你们在身边始终是我大学生涯中最美好的事情。

最后我还要感谢我的家人,在疫情期间给予我精神上以及物质上的支持。你们的支持让我拥有勇气继续前行。