

一种基于GPS终端的地图匹配方法

朱征宇 崔明 刘琳

(重庆大学计算机学院 重庆 400030) (软件工程重庆市重点实验室 重庆 400030)

摘要 提出了一种复杂度低、实时性好、匹配准确率高的综合地图匹配方法。该方法综合基于权重度量值和曲线拟合的地图匹配思想,并结合路网拓扑信息,提供实时准确的车辆位置信息,可应用于车辆监控、实时交通信息采集、车辆导航。还提出了车辆位置相关的弧投影算法和GPS信号无效时的航位推算算法。

关键词 地图匹配,权重,曲线拟合,路网拓扑,航位推算,投影

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Method of Map Matching Based on GPS Terminal

ZHU Zheng-yu CUI Ming LIU Lin

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Software Engineering Chongqing Key Lab, Chongqing 400030, China)

Abstract This paper presented a map matching method with lower complexity, better real-time and higher matching accuracy. The method, which is based on the weights measure and curve fitting map match ideology, and combined with road network topology information, provides vehicle location information timely and accurately, and can be applied to the vehicle monitoring, real-time traffic information collection, vehicle navigation. The paper also proposed the arc-projection algorithm with vehicle position-dependent and the dead reckoning algorithm used when the GPS signal is not valid.

Keywords Map matching, Weights, Curve fitting, Road network topology, Dead reckoning, Projection

1 引言

典型的浮动车GPS数据包含速度、方向和位置信息。由于GPS位置精度的原因,在结合电子地图分析处理时,GPS轨迹点往往会偏离路段^[1]。地图匹配是把GPS轨迹点矫正到车辆实际所在路段的正确位置上,只有判断出车辆在哪个路段上行驶,才能将GPS数据转化为路段的交通状态,因此,地图匹配在浮动车数据处理中非常关键^[2]。

目前地图匹配方法的研究较多,主要是基于几何信息和基于路网拓扑关系的匹配思想,常见的有基于权重度量值、基于曲线拟合、基于概率统计、基于相关性系数等若干种匹配算法^[3-7]。其中基于权重度量值的匹配算法,考虑距离、航向、可达性等因素^[2],实时性好,但在复杂路网下匹配准确度低;基于曲线拟合的匹配算法,充分利用历史数据,稳定性好,匹配精度高,一般较为复杂。也有方法使用DR、差分GPS等辅助设备,采用卡尔曼滤波、模糊逻辑、证据理论等方法提高地图匹配的准确率,但原理复杂,实现较为困难^[8-10]。可见,匹配准确率、算法复杂度和实时性是评价地图匹配算法的重要指标。

地图匹配应用于车辆监控、实时信息采集和车辆导航,主要有3大问题^[11]:①GPS数据需要实时处理,而数据量巨大对系统的计算速度要求苛刻;②服务器接收GPS数据间隔一

般较大,导致定位点之间的相关性较差;③现代城市路网密集且结构复杂,对系统的匹配容错率要求较高。

本文综合考虑匹配准确率、算法复杂度和实时性的评价指标,提出一种面向车辆位置跟踪的综合地图匹配方法;针对地图匹配面向应用时的主要问题,提出基于GPS终端进行地图匹配的应用思路;还提出了针对GPS信号无效时的航位推算算法和复杂度较低的位置相关的弧投影算法。

2 综合地图匹配

2.1 算法流程

本文提出的综合地图匹配方法流程如图1所示,各步骤的具体作用分别如下。

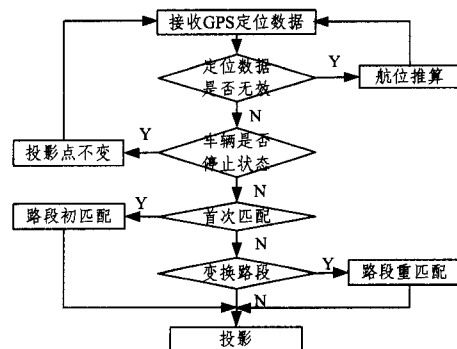


图1 地图匹配算法流程图

到稿日期:2012-07-31 返修日期:2012-12-01 本文受科技部国家科技支撑计划重点项目(2011BAH25B041)资助。

朱征宇(1959-),男,博士,教授,CFP会员,主要研究方向为Web智能检索、智能交通、数据库技术,E-mail:zhu_zhengyu@cqu.edu.cn;崔明

(1986-),男,硕士生,主要研究方向为智能交通;刘琳(1987-),女,硕士生,主要研究方向为智能交通。

①接收 GPS 定位数据:提取出经纬度坐标、速度、时间等,保存并更新定位数据队列(队列长度为 3)作为历史数据,在路段变换时,及时清除队列,并重新保存。

②判断定位数据是否无效(速度过快、坐标信息为零、偏离路段太远);若无效且定位数据队列为 3,则由航位推算估计车辆位置。

③航位推算:根据历史数据(定位数据队列)利用航位推算算法计算车辆当前坐标、速度、时间等信息(推算点),并根据推算点信息来更新定位数据队列。当前路段若是直线路段,则采用直线推算法,若是曲线路段(有折点),则采用折线段搜索法。

④判断车辆是否处于停止状态(接收到的 GPS 定位数据的速度为 0);若是,则匹配路段不变,投影点也不变。

⑤判断是否为首次匹配:车辆出发时或收到错误匹配反馈时进行的路段的匹配(即车辆当前位于何路段),视为首次匹配。判断是否为首次匹配,若是,进行路段初匹配。

⑥路段初匹配:根据定位数据队列的 3 个历史数据进行匹配,先将 GPS 点搜索圈内(半径为 V 的圆形区域,建议 $V=50\text{m}$)的所有路段作为候选路段,计算定位数据队列中的 3 个点与候选路段的总权值(平均距离最小、轨迹方向和路段方向最相似、可达性),权值最大的候选路段为匹配路段,将其作为当前路段,并根据行驶方向确定目标节点。

⑦判断是否变换路段:根据 GPS 速度、投影点与路段终点距离和 GPS 采集间隔,判断当前路段是否已走完,若是,则需重新匹配路段。

⑧路段重匹配:根据定位数据队列的 3 个历史数据和路网拓扑信息进行匹配,与道路初匹配不同的是,选择与当前路段有拓扑邻接关系且当前路段的终点(前方端点)能到达的路段作为候选路段。

⑨投影:将 GPS 点投影到当前路段上某个位置,若 GPS 点在终点临界区域内(以节点为圆心、临界区阈值 V 为半径的区域,建议 $V=50\text{m}$),则采用垂直投影法,否则采用弧投影法;记录投影点,并将其作为车辆在路段上的当前位置。

下面将分节对该方法采用的相应技术进行介绍。

2.2 匹配原理

本文的地图匹配方法综合利用了基于权重度量值和基于曲线拟合的地图匹配思想并结合了路网拓扑信息,缩小了候选路段范围,其实时性好,在满足匹配准确率的同时降低了复杂度。该方法采用“路一点一路”的模式:判断当前行驶路段,判断是否经过节点及变换路段,车辆变换路段后重新判断行驶路段。

1) 候选路段确定

路段初匹配时,将与 3 个 GPS 点搜索阈(以 GPS 点为圆心、搜索阈值为半径的区域,建议为 25m)都相交的所有路段作为候选路段;路段重匹配时,考虑路网拓扑信息,将与上一匹配路段有邻接关系的路段(一般不超过 5 条)作为候选路段,与基于网格的候选路段确定方法相比,其明显减少了候选路段的规模。

2) 距离权重

距离权重^[2,12]表示为: $W_D = D_w \times f(D)$,式中, D_w 表示距离权重系数。

$$f(D) = \frac{D_{TH} - D}{D_{TH}}$$

式中, D_{TH} 为距离阈值(25m), D 为 GPS 点到候选路段的距离。

为避免单点偶然性,本文 D 取 3 个 GPS 点到候选路段距离 $d_i (i=1,2,3)$ 的平均值 \bar{D} ,即:

$$\bar{D} = \sum d_i / 3$$

3) 方向权重

航向权重^[2]表示为: $W_H = H_w \times f(\Delta\theta)$,式中, H_w 表示航向权重系数, $f(\Delta\theta) = \cos(\Delta\theta)$, $\Delta\theta$ 取单个 GPS 点的航向与路段方向的夹角。

由于 GPS 信号偏差,使得单个 GPS 点航向偶然性大,本文基于曲线拟合匹配思路,选用方向权重取代航向权重, $\Delta\theta$ 取历史数据队列中最新两个 GPS 点组成线段方向与路段方向的夹角, $\Delta\theta$ 越小表示二者轨迹越相近(若路段为曲线,取路段以起始节点为端点的折线段)。

方向权重表示为:

$$W_F = F_w \times f(\Delta\theta)$$

$$f(\Delta\theta) = \cos(\Delta\theta), \Delta\theta = \arctan[\text{abs}(k_1 - k_2) / (1 + k_1 \times k_2)]$$

式中, F_w 为方向权重系数, k_1, k_2 为二者斜率。

4) 可达性

可达性是指依据当前车辆速度和 GPS 采集间隔信息、车辆行驶方向与路段方向的一致性,来判断有无可能到达候选路段,若可能,可达性参数 R_w 取 1,否则, R_w 取 0。可达性的判断用于地图初匹配。

5) 确定当前路段

本文基于权重度量值匹配思路,取权重总值最大的候选路段为当前路段。权重总值 $W = R_w (W_D + W_F)$,其中 D_w 和 F_w 分别取 0.5。

在复杂路网的地图匹配中,极易产生 Y-Junction 问题^[1,5]。如图 2 所示,车辆经过节点 B 后,很难只根据单点 GPS₃ 判断车辆在哪个路段上行驶。图 2 下所示根据 GPS 轨迹的整体趋势及整体路径的可行性来确定车辆是否在 BD 上^[1]。

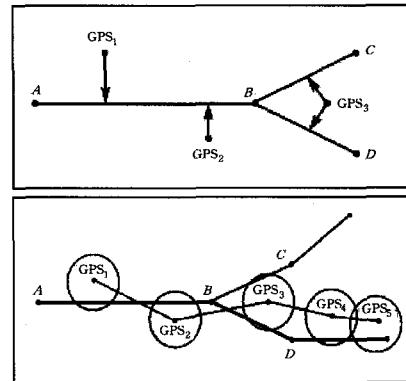


图 2 Y-Junction 问题

本文的方法更简单,当车辆经过节点 B 时,确定候选路段 BC、BD,根据 GPS₃ 和 GPS₄ 轨迹线段与候选路段的夹角关系,确定当前路段 BD。

2.3 基于 GPS 终端的地图匹配及应用

在车辆监控和实时数据采集中,一般的方法将 GPS 终端采集的大量 GPS 数据悉数传输到服务器,在服务器端对 GPS 数据进行有效性筛选、地图匹配等实时操作,进而获取车辆位置和交通信息^[13-15]。这样会产生引言中提到的问题:GPS 数据需要实时处理,而数据量巨大对系统的计算速度要求苛刻;

服务器接收 GPS 数据间隔一般较大,导致定位点之间的相关性较差^[11]。

如果将本文的综合地图匹配放在 GPS 终端处理,不但可以减小 GPS 数据间隔,还可以缓解服务器的工作负担。而当前 GPS 终端性能的普遍提升,能承担较复杂的运算,使得这一思路能够付诸实施。

1) 应用于实时数据采集

GPS 终端实时获取 GPS 定位数据,通过地图匹配,判断车辆实际行驶路段的正确位置,可通过计算到达路段起始节点和终止节点的時刻,估计该路段的行程时间,也可计算该路段的平均速度,然后将路段行程时间和平均速度等信息发送到服务器。

2) 应用于车辆监控

GPS 终端实时获取 GPS 定位数据,通过地图匹配,判断车辆实际行驶路段的正确位置,并计算投影点坐标,然后将路段信息及投影点坐标传输到服务器。

本文的地图匹配算法在满足匹配准确率的同时,考虑了实时性和复杂性,不仅可以应用于传统服务器上,也可以应用于 GPS 终端。

3 航位推算和投影算法

3.1 航位推算算法

航位推算算法用于在 GPS 数据丢失时,利用已获取的有效数据推算车辆当前最可能的位置,此算法包括用于直线路段时的直线推算法和用于曲线路段时的折线段搜索法。

如图 3 所示,直线推算法利用 GPS 数据丢失前的依次 3 个 GPS 点在路段上的投影点 $G1'(x_1, y_1)$ 、 $G2'(x_2, y_2)$ 和 $G3'(x_3, y_3)$ 进行推算。假设 3 点处速度分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 ,GPS 采集间隔时间为 Δt , $G2'$ 和 $G3'$ 间距离 $|G2'G3'|$ 为已知距离 s , $G4$ 点 (x, y) 为 GPS 数据丢失后的待推算位置。根据 v_i ($i=1, 2, 3$) 的变化规律估计 $G3'$ 和 $G4$ 点间的速度 v_4 及推算距离 d :

①如果 v_i ($i=1, 2, 3$) 基本相等或者大小无规律,视为匀速直线运动模型, v_4 取平均值,有:

$$d = v_4 \times \Delta t = (\sum v_i / 3) \times \Delta t$$

②如果 v_i ($i=1, 2, 3$) 满足 $v_1 > v_2 > v_3$ 或 $v_1 < v_2 < v_3$, 则视为加速或者减速运动,有:

$$d = v_4 \times \Delta t = (v_3 + \bar{a} \times \Delta t) \times \Delta t$$

其中:

$$\bar{a} = \frac{v_3 - v_1}{2 \times \Delta t}$$

根据相似三角形比例关系,推算点 $G4(x, y)$ 满足:

$$\frac{x - x_3}{x_3 - x_2} = \frac{d}{s} \quad \frac{y - y_3}{y_3 - y_2} = \frac{d}{s}$$

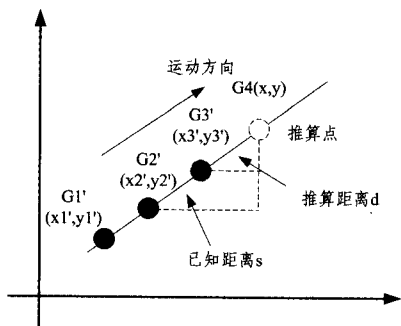


图 3 直线推算法

如图 4 所示,折线段搜索法将曲线路段 $V_0V_iV_n$ (V_0V_n 为起终点, V_i 为路段折点, $i < n$) 看成是一系列相连接的折线段 V_iV_{i+1} 组成,折点 V_i 坐标已知,折线段长度可求。根据 v_i ($i=1, 2, 3$) 的变化规律估计 $G3'$ 和推算点 $G4$ 点间的推算距离 d ,依次遍历曲线路段 $V_0V_iV_n$ 的所有折线段,确定包含 $G4(x, y)$ 的折线段 V_iV_{i+1} 及折点 V_{i+1} 到 $G4$ 的距离 d' 、折点 V_i 到 $G4$ 的距离 s' ; 设折线段 $V1V2$ 包含推算点 $G4$, 则 $d' = |G4V2|$, $s' = |V1G4|$, 根据相似三角形比例关系,推算点 $G4(x, y)$ 满足:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{s'}{d' + s'}, \quad \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{s'}{d' + s'}$$

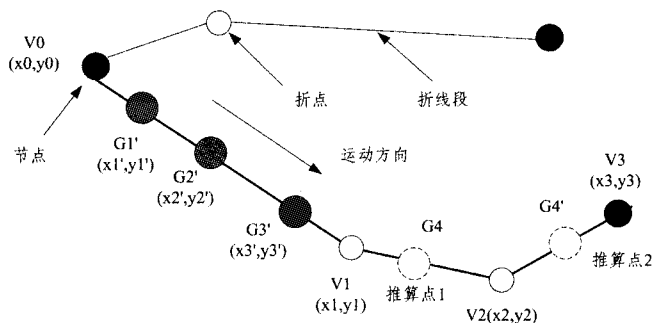


图 4 折线段搜索法

3.2 投影算法

投影算法用于将 GPS 点匹配到当前路段上的正确位置。在城市复杂路网下, GPS 信号靠近路段节点处偏差更严重,将 GPS 点在路段上的垂点做投影点更准确。考虑到算法复杂性、曲线路段的投影,本文提出了弧投影算法。若 GPS 点在当前路段终节点的临界区内,采用传统的垂直投影法计算投影点,否则使用复杂度更低的弧投影法计算。

如图 5 所示,垂直投影法是指将 GPS 点垂直投影到当前路段折线段 V_iV_n 上, V_n 为当前路段终节点(当前路段为直线时, V_i 为起节点)。假设当前路段为 $V_0V_1V_2V_3$, GPS 点 $G(x, y)$ 位于终节点 V_3 的临界区内,用坐标可求 $d = |AV_3|$, 用 MapX 接口函数可求 G 点到折线段的垂直距离 s , 则可利用直角三角形勾股定理, 求出投影点 $G'(x', y')$ 坐标。

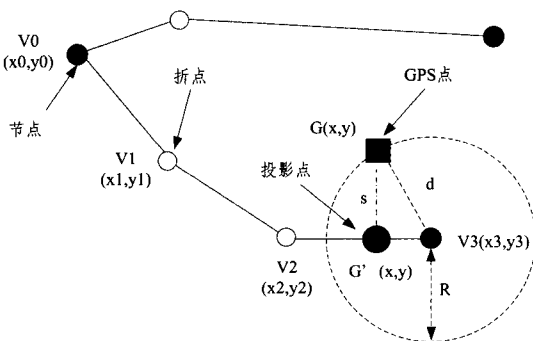


图 5 垂直投影法

如图 6 所示,弧投影法是指在路段 $V_0V_iV_n$ 的折线段 V_iV_{i+1} 上寻找投影点 G' , 使得 GPS 点 G 到 V_{i+1} 的距离 R 、 G' 到 V_{i+1} 的距离 b 满足条件 $b=R$, 即以 V_{i+1} 为圆心, R 为半径作弧与折线段 V_iV_{i+1} 的交点即为投影点 G' 。遍历路段 $V_0V_iV_n$ 选择折线段 V_iV_{i+1} , 使得 GPS 点 G 到 V_n 的距离 s 、 V_{i+1} 到 V_n 的距离 s' 满足 $s > s'$ 。

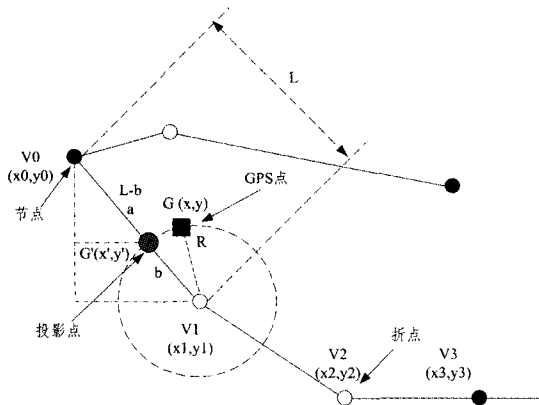


图6 弧投影法

假设有 GPS 点 $G(x, y)$ 、路段 $V_0V_1V_2V_3$ ， V_0 和 V_3 分别为路段起节点和终节点， V_1 和 V_2 为路段折点，路段 $V_0V_1V_2V_3$ 由折线段 V_0V_1 、 V_1V_2 和 V_2V_3 组成。 V_0V_1 包含投影点 G' ，满足 $|GV_3| > |V_1V_3|$ ，且 $|GV_1| = |G'V_1|$ 。

已知折线段 $|V_0V_1| = L$ ， $|GV_1| = |G'V_1| = b$ ， $V_0(x_0, y_0)$ ， $V_1(x_1, y_1)$ ，根据相似三角形比例关系，投影点 $G'(x', y')$ 满足：

$$\frac{x' - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{L - b}{L} \quad \frac{y' - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{L - b}{L}$$

4 实验验证

本文分别在服务器端 (CPU2.13GHz, 内存 2G) 和 GPS 终端 (处理器 624MHz, RAM128M, 型号为 SGH-i908E) 进行了验证实验，其中 GPS 终端具备以下参数：1) Windows mobile 6.0 操作系统；2) 安装 MapInfo mobile 5.0 插件；3) MapInfo 格式电子地图 (重庆市)。在构建路网时，提取路段、节点及折点信息，并根据路段邻接关系组成路网；将路段折线段化，把路段看成是由一系列相互连接、长度可知的折线段组成。

图 7 示出在复杂路网下，将 GPS 定位数据匹配到实际行驶道路上 (深色线)；图 8—图 10 分别给出了 Y-Junction 问题、平行路段及复杂路况下的匹配和弧投影效果，其中方点为 GPS 点，圆点为投影点，圆点所在路段为当前匹配路段。图 11 给出的是在 GPS 终端实施地图匹配，应用于实时路况采集时，获得到达路段的节点时刻效果。

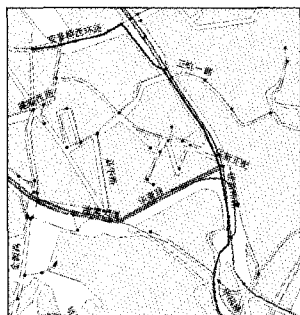


图7 地图匹配效果

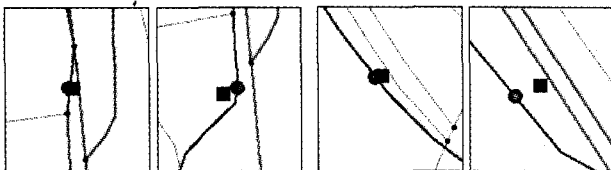


图8 Y-Junction 问题下的匹配

图9 平行道路下的匹配

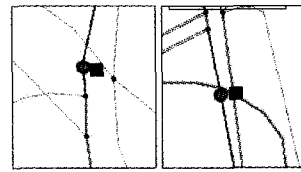


图10 复杂路况下的匹配

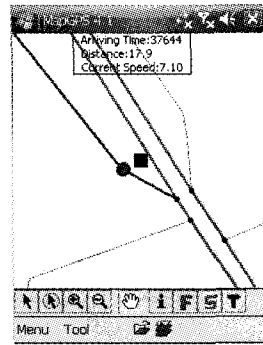


图11 估计到达节点时刻

由于只在车辆出发时或收到错误匹配反馈时，才进行路段初匹配，当首次匹配确定当前路段后，路段重匹配从全局路网 (规模为 n) 选出有邻接关系的路段 (规模一般小于 5) 作为候选路段，并从中选出权重总值最大的作为匹配路段，因此算法复杂度应小于 $O(n)$ 。

表 1 给出的是本文提出的地图匹配方法与基于 GPS 轨迹数据的匹配方法^[1]、基于网格确定候选路段的匹配方法 (测试服务器: CPU2.53GHz, 内存 2G)^[2] 的复杂度 (C)、GPS 终端单次匹配耗时 (T_{GPS})、服务器单次匹配耗时 (T_S)、平均匹配准确率 (MA)、采集间隔 (CI) 的比较情况。需要特别说明的是，在 GPS 终端进行单次地图匹配平均耗时 119 毫秒，在 GPS 采集间隔 (2s) 内足以完成一次地图匹配。与文献 [1] 的匹配方法相比，本文方法具有较高的匹配准确率，同时复杂度更低，在 GPS 终端处，实施地图匹配时，可降低采集间隔，增加 GPS 定位信息的关联性。与文献 [2] 的匹配方法相比，本文方法在测试服务器性能稍差的情况下，单次匹配耗时明显降低。

表1 算法性能比较

评价指标	C	T_{GPS}	T_S	MA	CI
本文方法	$O(\log n)$	119ms	170us	97.5%	2s
文献[1]	$O(n)$	—	—	97.5%	10s
文献[2]	—	—	931us	96.55%	—

表 2 是车辆沿路段 298—264—265 行驶的 3 次地图匹配情况，候选路段数较少，计算距离、方向权重所获得的综合权重最大的为匹配路段。

表2 连续 3 次匹配候选路段和匹配路段

NO	RID	D	$\cos(\Delta\theta)$	W_D	W_F	W
1	298	2.0	0.996	0.46	0.498	0.958
	419	27.5	0.028	-0.04	0.014	-0.026
2	264	7.5	0.999	0.36	0.499	0.859
	300	23.5	0.444	0.04	0.222	0.262
3	265	14.5	0.993	0.22	0.496	0.716
	633	22	0.152	0.06	0.076	0.136

注：表 2 中各列符号的含义如 2.2 节中所述。

结束语 基于 GPS 终端的路段行程时间采集、车辆跟踪、可视化车辆导航等新方法，虽然具有采集内容简单、能够

分担服务繁重工作量等优点,但其计算精度高度依赖于地图匹配的准确性。本文提出了一种综合地图匹配方法,该方法结合了路网拓扑信息,缩小了候选路段范围,综合了基于权值度量值和曲线拟合匹配思想的优点。实验分析表明,该方法单次地图匹配耗时少,匹配准确率较高,且复杂性低,能很好地满足基于 GPS 终端的采集新方法对实时地图匹配的高要求。

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
- [2] 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
- [3] Bersteind, Kornhauser K. An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants[R]. TIDE Centre Technical Report. New Jersey, 1996
- [4] Quddusma. High Integrity Map Matching Algorithms for Advanced Transport Telematics Applications[D]. London; University of London, 2006
- [5] Quddusma, Washingtonyo, Robertbn. Current Map-matching Algorithms for Transport Applications; State of the Art and Future Research Directions[J]. Transportation Research Part C, 2007(15):312-328
- [6] 卢文涛,周银东,梅顺良,等. 基于拓扑结构的地图匹配算法研究

[J]. 测控技术,2010,29(6):73-76

- [7] 周璞,刘卫宁,孙棣华. 基于路网拓扑结构的无方向参数地图匹配算法[J]. 计算机工程与应用,2006(33):188-190
- [8] 高建,石娟,孙晓琳. 基于卡尔曼滤波的导航道路地图匹配方法研究[J]. 工程勘察,2009(11):77-80
- [9] 胡林,谷正气,杨易. 基于权值 D-S 证据理论的车辆导航地图匹配[J]. 中国公路学报,2008,21(2):116-120
- [10] 苏海滨,王光政,王继东. 基于模糊神经网络的地图匹配算法[J]. 北京科技大学学报,2012,34(1):43-47
- [11] 朱丽云,郭继孚,温慧敏,等. 一种适用于复杂城市路网的浮动车实时地图匹配技术[J]. 交通与计算机,2007,25(6):81-84
- [12] Velaga N R, Quddus M A, Bristow A L. Developing an Enhanced Weight-based Topological Transport Systems[J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2009, 7:672-683
- [13] 姜桂艳,常安德,吴超腾. 基于 GPS 浮动车的交通信息采集方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(4):971-975
- [14] Byon Y J. GPS-GIS integrated system for travel time surveys [D]. Toronto; University of Toronto, 2005
- [15] Liu Chun, Meng Xiao-lin, Fan Ye-ming. Determination of Routing Velocity with GPS Floating Car Data and Web GIS-Based Instantaneous Traffic Information Dissemination [J]. The Journal of Navigation, 2008, 61(2):337-353

(上接第 273 页)

为了验证本算法对噪声的鲁棒性,采用具有不同噪声水平的低分辨率图像作为输入图像。低分辨率图像的高斯噪声方差分别为 10, 12, 14。测试算法中的参数都采用固定参数。图 2 给出了 4 种比较算法在不同噪声水平下,重建结果图像的平均 PSNR 值。从图中可以看出,本文方法均取得了最高的 PSNR 值。这表明,较之参照算法,本文算法对噪声具有更强的鲁棒性。

结束语 本文提出了一种基于稀疏和 K 近邻稀疏编码均值共同约束的人脸图像超分辨率算法。有两方面措施被用于改善人脸图像超分辨率重建的效果,一是将人脸的块位置作为先验信息,并为每个输入图像块提供一个特定的高、低分辨率字典对,从而提高了低分辨率图像块的稀疏编码精度;二是利用 K 近邻稀疏编码均值约束低分辨率图像块的稀疏编码过程,保证了超分辨率重建过程中稀疏编码系数在映射前后的一致性。实验结果验证了所提算法的有效性,较之参考算法,本方法在保持重建人脸图像相似度的基础上,改善了人脸图像的清晰度,增强了超分辨率图像的质量。

参考文献

- [1] Baker S, Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(9):1167-1183
- [2] Wang Xiao-gang, Tang Xiao-ou. Hallucinating face by eigen-transform[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviess, 2005, 35(3):425-434
- [3] Chang Hong, Yeung D-Y, Xiong Yi-min. Super-resolution through neighbor embedding[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2004:275-282
- [4] Yang Jian-chao, Tang Hao, Ma Yi, et al. Face hallucination via

sparse coding [C] // IEEE Conference on Image Processing. 2008:1264-1267

- [5] Liu C, Shum H, Freeman W T. Face hallucination: Theory and practice[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 75(1):115-134
- [6] Huang H, He H, et al. Super-resolution of human face image using canonical correlation analysis [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7):2532-2543
- [7] Ma X, Zhang J, Qi C. Hallucinating face by position-patch[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1):2224-2236
- [8] Jung C, Jiao L, Liu B, et al. Position-Patch Based Face Hallucination Using Convex Optimization[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(6):367-370
- [9] Dong W, Zhang L, Shi G. Centralized Sparse Representation for Image Restoration [C] // IEEE Conference on Computer Vision. 2011:1259-1266
- [10] Chang L, Zhou M. Face Sketch Synthesis via Sparse Representation [C] // IEEE Conference on Pattern Recognition. 2010:2146-2149
- [11] Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the Lasso [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, (Methodological), 1996, 58(1):267-288
- [12] Aharon M, Elad M, Bruckstein A M. The K-SVD; An Algorithm for Designing of Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(11):4311-4322
- [13] Gao Wen, Cao Bo, Shan Shi-guang, et al. The CAS-PEAL Large-Scale Chinese Face Database and Baseline Evaluations[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part A, 2008, 38(3):149-161
- [14] Wang Z, Bovik, Sheikh A C H R, et al. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(14):600-612