

文章编号: 1007-4619 (2005)02-0215-05

基于道路精简滤波原理的车辆导航系统地图匹配算法

杨新勇¹, 黄圣国²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 针对交叉路口附近道路几何分布较为复杂的实际特点, 提出基于道路精简滤波(RRF)原理的地图匹配算法。研究了基于D-S证据理论的多规则数据融合技术在二路段地图匹配中的应用。建立了最短欧氏距离和最小航向差两条判决规则。引入相关性模糊决策理论, 将多路段匹配问题简化为二路段匹配问题, 使D-S证据判决规则的概率分配函数能根据实际路网分布作适应性调整, 提高了算法的鲁棒性。对实际跑车数据的仿真处理结果表明, 应用该算法可以较好地解决城市交叉路口地图匹配问题。

关键词: 地图匹配; D-S证据推理; 模糊决策; 数据融合; 道路精简滤波

中图分类号: V249.32 **文献标识码:** A

1 引 言

在车辆导航定位系统中, 利用数字化地图数据融合定位结果以产生最佳位置估计的技术称为地图匹配。研究表明: 当车辆行驶在道路间隔较为疏远的区域时, 现有的匹配算法较为有效; 而由于实际行车路线的改变大多发生在交叉路口附近, 且该区域的道路网络分布常常较为复杂。因此, 针对交叉路口附近路网分布特点的地图匹配问题应引起足够重视。

本文提出了一种新颖的道路精简滤波(RRF)地图匹配算法, 以解决车辆行驶在交叉路口附近时的匹配问题。该算法采用基于相关性概念的模糊决策理论, 使得在路网错综复杂的行车区域的多路段匹配问题, 简化为任意两条待配路段之间单独比较排序的二路段匹配问题。同时, 引入基于Dempster-Shafer(D-S)证据推理的多判决准则数据融合技术, 保证了算法具有较强的自适应能力。

2 D-S 证据推理

D-S证据理论是对经典贝叶斯理论的概括与扩展, 它满足比概率论弱的公理, 并能够区分不确定和不知道的差异。通常, D-S证据理论可用于解决不

同类型的多传感器数据融合问题, 以获得最佳决策^[1]。

设 Θ 是样本空间, 领域内的命题都可以用 Θ 的子集表示。

定义 1 设函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 且满足

$$\begin{aligned} m(\phi) &= 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

则称 m 是 2^Θ 上的概率分配函数, $m(A)$ 称为 A 的基本概率数, 表示对 A 的精确信任。

定义 2 命题的信任函数 Bel 与似然函数 Pl 分别定义为

$$\begin{aligned} Bel(A) &= \sum_{B \subseteq A} m(B) \\ Pl(A) &= \sum_{B \cap A \neq \phi} m(B) \\ Pl(A) &= 1 - Bel(\bar{A}) \end{aligned} \quad (2)$$

定义 3(D-S 合成公式) 设 S_1 和 S_2 是 Θ 上的两个概率分配函数, 则其正交和为 $S = S_1 + S_2$ 定义为:

$$\begin{aligned} m_\theta^S(\phi) &= 0 \\ m_\theta^S(A) &= k_\theta^{-1} \cdot \sum_{A_i \cap B_j = A} m_\theta^{S_1}(A_i) \cdot m_\theta^{S_2}(B_j) \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$k_\theta = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_\theta^{S_1}(A_i) \cdot m_\theta^{S_2}(B_j)$$

收稿日期: 2003-10-20; 修订日期: 2003-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 79870032)

作者简介: 杨新勇(1973—), 男, 河南省郑州市人, 博士生。2001年毕业于南京航空航天大学机电工程学院。现于南京航空航天大学自动化学院攻读博士学位, 主要从事计算机测控, 数字信号处理等方面的研究工作。已在国内核心期刊发表学术论文9篇。

$$= \sum_{A_i \cap B_j \neq \phi} m_{\theta}^{S1}(A_i) \cdot m_{\theta}^{S2}(B_j) \quad (4)$$

如果 $k_{\theta} \neq 0$, 则正交和 m_{θ}^S 也是一个概率分配函数; 如果 $k_{\theta} = 0$, 则不存在正交和 m_{θ}^S , 称 m_{θ}^{S1} 和 m_{θ}^{S2} 矛盾。

3 基于 D-S 推理的二路段地图匹配

为保证匹配算法的实时性, 并不直接计算定位点到每条路段的距离以确定是否该路段为待配路段, George Taylor 认为^[2], 以单频 GPS 接收机为车辆提供定位信息, 选择距原始定位点 100m 内的道路(以道路中心线表示)为计算路段。可以肯定, 车辆位于这些路段的置信度为 95% (SA 限制取消以前)。考虑到多路径效应, GPS 信号不可用等引起的量测误差, 本文仍取以测量点为中心, 半径 $R = 100\text{m}$ 范围内的路段为匹配计算路段。

根据匹配算法的一般原理, 建立两条匹配判决准则:

(1) 测量点与行车路段的欧氏距离应为最小(最短欧式距离)。

(2) 行车路段方向应最接近车辆行驶方向(最小航向差)。

因此, 基于 D-S 证据推理的地图匹配算法归结为对两条判决准则的可信度进行有效的数据融合, 以正确识别出车辆行驶路段。

首先考虑最为简单一类道路匹配问题: 即 $R = 100\text{m}$ 内待配路段只有两条。根据 D-S 证据理论, 选择目标识别框 $\Theta = \{ \text{Yes}, \text{No}, \text{Per} \}$, 是对问题“该路段是车辆当前的行驶路段么?”所有答案的集合。

由 GPS 或 GPS/DR 提供的车辆位置坐标测量值/估计值, 数字地图提供的待配路段坐标值。得到最短欧式距离判决准则的概率分配函数(图 1)。其中 dis 为测量点到路段的欧式距离。

定义路段方向与车辆行驶方向之间的航向差(图 2, 式(5)):

$$\Delta Heading = \min(|\alpha - \theta|, |\alpha - \theta + \pi|) \quad (5)$$

其中: $\theta \in [0, \pi]$

最小航向差判决准则的概率分配函数如图 3。

ka 为该准则概率分配函数的调整系数。对于二路段地图匹配问题, 假设两条待配路段的方向角为 α_1, α_2 (图 2), 则路段方向差。

$$\Delta\alpha = \min(|\alpha_1 - \alpha_2|, |\alpha_1 - \alpha_2 + \pi|) \quad (6)$$

经验认为, 当两条待配路段的方向差 $\Delta\alpha$ 较小时, 匹配算法以最短欧式距离准则为主。而当 $\Delta\alpha$

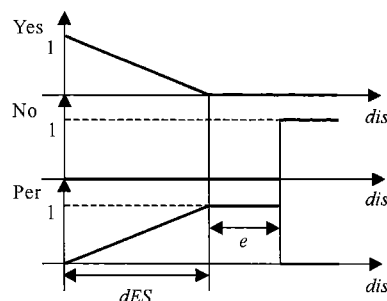


图 1 最短欧式距离判决准则的概率分配函数

Fig. 1 Mass assignment of the proximity

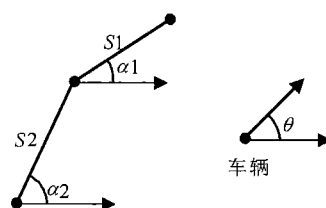


图 2 路段方向与车辆行驶方向

Fig. 2 Road segment and vehicle heading

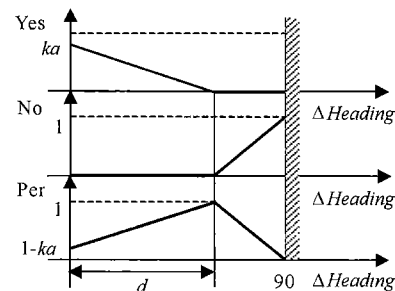


图 3 最短航向差判决准则的概率分配函数

Fig. 3 Mass assignment for the angular criterion

较大时, 应相应提高最短航向差判决准则的重要性。故 ka 为 $\Delta\alpha$ 的函数: $ka = f(\Delta\alpha)$ 。本文取

$$ka = \begin{cases} \Delta\alpha/A & \Delta\alpha \leq A \\ 1 & \Delta\alpha > A \end{cases} \quad (7)$$

根据上述两条判决准则的概率分配函数及 D-S 推理合成公式(定义 3), 得到融合后的概率分配函数(可信度)。取 $\max\{m_{s1}(\text{Yes}), m_{s2}(\text{Yes})\}$ 对应的道路判定为该时刻的行车路段。

4 基于自适应模糊决策的匹配算法

对于交叉路口附近常见的多路段匹配, 由于道路网络分布的复杂性, 降低了基于 D-S 推理算法的可用性。主要是因为:

(1) 将所有待配路段作为一个整体进行判决准则的数据融合运算,调整系数 ka 难以根据具体的道路几何分布作适应性调整。

(2) 即使逐一对任意两条路段都采用 D-S 推理算法进行匹配计算,得到的具有最高可信度分配值的路段也未必是实际行车路段。因为该类型的排序不具有传递性。为解决多路段地图匹配中的非传递性排序问题^[3],本文引入相关性概念。

令 x 和 y 为定义在 X 域上的变量,并定义对偶函数:

$f_y(x)$: x 关于 y 的隶属函数

$f_x(y)$: y 关于 x 的隶属函数

于是相关性函数定义为:

$$f(x|y) = f_y(x) / \max[f_y(x), f_x(y)] \quad (8)$$

它是对“选择 x 大于 y ”的隶属度值的一种度量。

对于多变量情况下式(8)的一般形式,所有变量 $x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n$, 全部定义在 X 域上,且令这些变量包含在集合 A 中,即 $A = \{x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$ 。另外,再定义一个除不包括元素 x_i 外与集合 A 等价的新的集合,记为 A' ,则相关性函数为:

$$f(x_i, A') = f(x_i | \{x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}) = \min\{f(x_i | x_1), f(x_i | x_2), \dots, f(x_i | x_{i-1}), f(x_i | x_{i+1}), \dots, f(x_i | x_n)\} \quad (9)$$

上式是对“选择 x_i 的倾向超过 A' 中所有元素”的模糊测度。由于一个变量关于自身的相关性函数具有同一性,即

$$f(x_i | x_i) = 1 \quad (10)$$

所以

$$f(x_i | A') = f(x_i | A) \quad (11)$$

构造相关值 $f(x_i | A')$ 的矩阵,这里 $i, j = 1, 2, \dots, n$; x_i 和 x_j 定义在 X 域上。此矩阵为方阵且秩为 n , 记为 C 阵。

为确定总次序,需找出 C 阵每一行中最小值,即

$$C'_i = \min f(x_i | X) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

这里 C'_i 为第 i 个变量的隶属度排序值。

将标记为 x_1, x_2, \dots, x_n 的 n 条待配路段不是作为一组,而是两两成对比较,以确定哪一个为最优选择。首先应确定“待配路段对”隶属函数。这些函数近似地表示了两条路段单独比较时的主观测度值。

一种简单两条路段单独比较时的隶属函数确定方法是定义车辆在第 k 个采样点时刻的测度因子为^[4]

$$C(k) = \alpha \cdot H(k) = \beta \cdot D(k) \quad (13)$$

其中 $\alpha \geq 0$ 且 $\beta \geq 0$ 。

α, β 值的大小与车辆历史行驶轨迹,航向,待配路段的空间几何分布均存在一定关系。

由此可以定义相关函数:

$$f(x_i | x_j) = C_j(k) / \max[C_i(k), C_j(k)] \quad (14)$$

本文以根据 D-S 证据推理得到融合后的概率分配函数值为确定“待配路段对”隶属函数的依据。

对于 n 条待配路段中的任意两条 $x_i, x_j, (i \neq j)$, 根据基于 D-S 证据推理的二路段地图匹配算法(第3节),得到融合后的 x_i, x_j 的概率分配函数 m_i, m_j 。定义隶属函数

$$\begin{cases} f_{x_j}(x_i) = m_i(\text{Yes}) \\ f_{x_i}(x_j) = m_j(\text{Yes}) \end{cases} \quad (15)$$

相关函数为:

$$f(x_i | x_i) = m_i(\text{Yes}) / \max[m_i(\text{Yes}), m_j(\text{Yes})] \quad (16)$$

则比较矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} f(x_1 | x_1) & f(x_1 | x_2) & \dots & f(x_1 | x_n) \\ f(x_2 | x_1) & f(x_2 | x_2) & \dots & f(x_2 | x_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(x_n | x_1) & f(x_n | x_2) & \dots & f(x_n | x_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

再由式(12)即可确定第 i 个变量隶属度排序值。具有最大隶属度排序值路段即为匹配路段。即

$$C' = [\min f(x_1 | x_i), \min f(x_2 | x_i), \dots, \min f(x_n | x_i)]^T \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

匹配路段 MR 满足

$$C'_{MR} = \max(C'_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

5 仿真试验分析

对南京城区局部航拍照片(1:1万,精度为10m)进行路网的矢量化处理(北京54坐标系),并转为地图匹配所需的WGS84坐标。2003-04-15进行了纯GPS(接收机型号为Garmin 25LV)路测试验。图4为市中心某交叉路口附近的路网分布及实际行车路线。

在400m×500m区间内共包含44,139(路段编号)等8条路段,4个交叉点。各路段均为双行线。车辆位置与航向估计值由GPS接收机提供。行车时间为70s,行车路线为31→111→44。采用本文提出的道路精简滤波匹配算法进行道路匹配计算。

在利用D-S证据推理理论进行多准则数据融合计算时,需确定 dES, e, d, ka 等初始参数。严格来

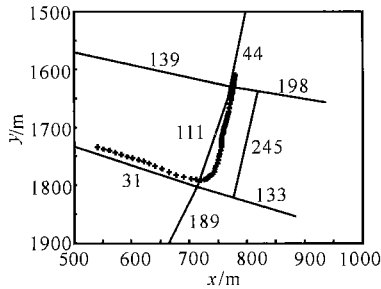


图 4 某区域路网分布及行车路线

Fig. 4 Experimental situation in a digital map grid

讲, dES, e 应根据定位误差椭圆来确定^[5]。考虑到车辆位于以测量点为圆心, 半径 $R = 100\text{m}$ 范围外的概率很小, 本文取 $dES + e = 100$, 亦可适当放宽路段搜索范围, 取 $dES + e > 100$ 。 d 值与导航系统航向测量传感器的精度有关, 对 GPS/MM 导航系统, 车辆航向由 GPS 提供, 其输出航向精度在低速行驶时受车辆速度 v 的影响很大, 为 v 的函数。 ka 可根据实验方法加以调整确定。

首先取 $ka = 1$, 即匹配算法不能根据道路之间的几何分布对航向信息在总体决策中的比重作出适应性调整。实际上, 航向信息可信度的自适应调整意味着间接改变了距离信息的可信度。初始参数 $[dES, e, d] = [30, 70, 30]$ 时的匹配结果如图 5(a) (排序值已做归一化处理)。

从图 5(a) 可以看出, 由于未根据实际道路的几何分布对航向, 距离等判决规则进行适应性信息比

重分配, 导致在路网密集的该行车区间内, 多次发生误配现象。主要由靠近路段 111, 且走向与其平行的路段 245 所引起。同时, 车辆进入路段 44 后, 路段 111 排序值衰减较慢。调整 $[dES, e, d]$, 可得到类似结果。

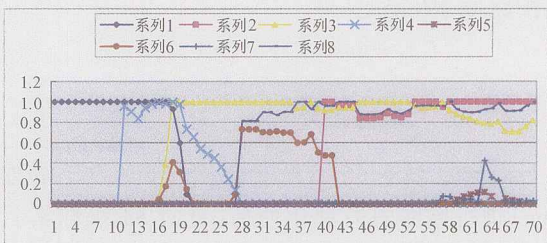
根据任意两条路段 $\Delta\alpha$ 的大小, 实时调整概率调整系数 ka , 并选择不同的初始参数 $[dES, e, d, A]$, 以此分析道路精简滤波匹配算法的有效性与可靠性以及各初始参数对匹配过程及匹配结果的影响程度。

5.1 固定 $[d, A]$, 改变 $[dES, e]$

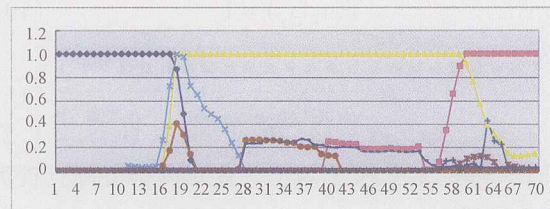
$[dES, e, d, A] = [30, 70, 30, 45]$ 时的匹配结果如图 5(b)。

可以看出, 道路精简滤波匹配算法能够正确识别车辆当前的行驶路段。使车辆始终行驶在正确的路段上。在大部分时间内, 行驶路段的模糊隶属度排序值以较大优势领先于其余路段。其它竞争路段的排序值均小于 0.4。但在第一个转弯处 31→111, 有几个测量点会匹配到路段 133。但笔者认为, 并不能因此称之为“误配”。这主要是因为, 在转弯过程中, 车辆处于 31→111 的过渡阶段, 严格来讲, 车辆并不位于任何一条道路上。从图 5(b) 亦可看出, 该时段内路段 31, 133, 111 的排序值非常接近, 处于胶着状态。且 31 呈递减趋势, 111 呈递增趋势, 这与事实情况非常吻合。在第二个路口 111→44, 未有待配路段会对行驶路段的正确选择构成较大威胁。

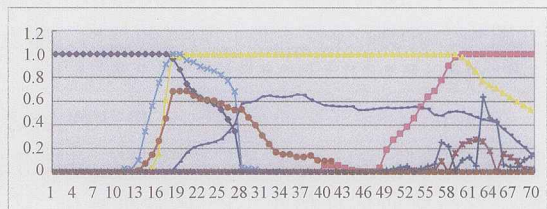
$[dES, e, d, A] = [20, 30, 30, 45]$ 时的匹配结果如图 5(c)。



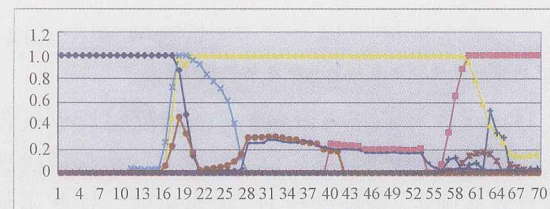
(a) $[dES, e, d] = [30, 70, 30]$ $ka = 1$ (无自适应)



(b) 固定 $[d, A]$, 改变 $[dES, e]$ 。 $[dES, e, d, A] = [30, 70, 30, 45]$



(c) 固定 $[d, A]$, 改变 $[dES, e]$ 。 $[dES, e, d, A] = [70, 30, 30, 45]$



(d) 固定 $[dES, e, A]$, 改变 d 。 $[dES, e, d] = [30, 70, 30]$, $[A] = [30, 60]$

图例中的 [系列 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] 对应路段 [31, 44, 111, 133, 139, 189, 198, 245]

图 5 道路精简滤波地图匹配算法仿真曲线

Fig. 5 Road segments rank-ordering value for the degree of membership

dES, e 的变化引起最短欧式距离判决准则概率分配函数的改变。当 dES 增大时,使得 $dis < dES$ 范围内的最短欧式距离判决准则的可信度增大,从而引起融合后的该范围内的路段排序值增大。如路段 189, 245, 198 等。而对距测量点较远的路段的排序值,则影响不大。即便如此,较高的 dES 值 ($dES = 70$) 仍然能做到正确匹配。

5.2 固定 $[dES, e, A]$, 改变 d

取 $[dES, e, d, A] = [30, 70, 30, 45], [30, 70, 70, 45]$ 等做了多组仿真实验,匹配结果及各路段排序值类似于图 5(b), (c)。

5.3 固定 $[dES, e, d]$, 改变 A

取 $[dES, e, d] = [30, 70, 30], A = 30, 60$ 时的匹配结果均如图 5(d)。

在一定范围内调整 A , 均能得到类似的且非常理想的匹配结果。

从以上的对比实验可以看出:由于 $[dES, e, d]$ 的变化会影响到各判决规则的概率分配函数,当 dES, d 增大时,测量点临近的或行车方向接近的竞争路段的排序值会相应增加。但在较宽的取值范围内,不会影响到最终的正确路段选择。在一定范围内, A 值的变化对排序值与匹配结果的影响较小。

6 结 论

理论分析与仿真实验结果表明,由于采用了解

决非传递性排序问题的模糊决策理论与基于 D-S 证据推理的多规则数据融合理论,基于道路精简滤波原理的地图匹配算法非常适用于解决交叉路口附近的多路段地图匹配问题。其中, D-S 证据理论对多判决规则进行有效的数据融合,并为模糊决策提供所需的隶属函数;而两两单独比较排序的决策方式,又可使 D-S 证据理论在进行数据融合时,能够充分考虑实际路网的几何分布,实时调整各判决规则的可信度。使匹配算法表现出较强的自适应能力。

参 考 文 献 (References)

- [1] M E El Najar, Ph Bonnifait. Multi-Criteria Fusion for the Selection of Roads of An Accurate Map [A]. 15th Triennial World Congress [C]. Barcelona, Spain, 2002.
- [2] Taylor G, G Blewitt. Road Reduction Filtering Using GPS [A]. 3th AGILE Conference on Geographic Information Science [C]. Helsinki, Finland, May 25—27, 2000.
- [3] Shimura M. Fuzzy Sets Concept in Rank-ordering Objects [J]. *Math*, 1973, 43(4): 717—733.
- [4] Sinn Kim, Jong-Hwan Kim. Adaptive Fuzzy-network Based C-measure Map-matching Algorithm for Car Navigation System [J]. *IEEE Trans on IE*, 2001, 48(2): 432—441.
- [5] Peng F, Liu Z K, Zhang Q S. Cost Function Based Map Matching Algorithm for GPS/DR Integrated Navigation Systems [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(3): 261—264. [彭飞, 柳重堪, 张其善. 基于代价函数的组合导航系统地图匹配算法 [J]. 北京航空航天大学学报. 2002, 28(3): 261—264.]

Map Matching Algorithm Based on Road Reduction Filter in Integrated Vehicle Navigation System

YANG Xin-yong¹, HUANG Sheng-guo²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A Map Matching Algorithm Based on Road Reduction Filter (RRF) is proposed in this paper, which pays particular attention to the matching problems that arise at intersections. Application of credibilist multi-criteria association using belief theory and Dempster-Shafer's rule in only two roads map matching problem is studied. Two criteria, the shortest Euclidean distance and the smallest angle difference between road segment and vehicle heading are presented. Moreover, the correlation theory is introduced to simplified MM problems from multiroad segments to only double road segments. As a result, the probability assignment function in criteria can be adjusted adaptively in accordance with actual road network. Simulation results with actual field experimental data show that RRF can perfectly solve the MM problem at urban intersections.

Key words: map matching, D-S evidence reason; fuzzy decision; data fusion; road reduction filter