

基于多传感器信息融合城市车辆导航定位*

沈雪松^{1,2}, 刘建业¹, 孙永荣^{1,3}, 陈武³, 鹿鸣²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院 导航研究中心, 江苏 南京 210016

2. 香港理工大学 土木及结构工程学系, 香港;

3. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港))

摘要: 针对全球定位系统信号易受城市复杂的环境干扰, 接收不可靠, 航位推算只能进行短时间高精度导航、地图匹配仅在拐弯处才能提供与地图精度相当的修正信息、城区车辆导航存在“盲区”问题, 研制了采用蓝牙技术的新型路标传感器, 研究了基于自适应联合卡尔曼滤波算法的多传感器信息融合技术。大量的试验研究表明: 采用该信息融合技术后, 城区车辆导航定位精度达到 10 m 以内, 符合高精度导航定位要求。

关键词: 信息融合; 车辆导航; 蓝牙路标传感器; 联合卡尔曼滤波

中图分类号: V249.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2006)01-0085-04

Vehicle navigation and positioning based on multi-sensor information fusion for urban application

SHEN Xue-song^{1,2}, LIU Jian-ye¹, SUN Yong-rong^{1,3}, CHEN Wu³, LU Ming²

(1. Navigation Res Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Dept of Civil & Structural Engin, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Dept of Land Surveying and Geo-informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: A new kind of Beacon sensor based on Bluetooth technology is studied to overcome the “navigation blind region” in urban areas, which caused by the blockage of GPS signal due to complicated environment, increasing error of dead reckoning and shortage of map matching. Multi-sensor fusion technology based on adaptive federated Kalman filter is researched. Finally, a field test is performed, and the result shows that the proposed multi-sensor fusion algorithm can supply high precision vehicle navigation in urban, and positioning accuracy less than 10 m is received.

Key words: information fusion; vehicle navigation; bluetooth beacon (BB) sensor; federated Kalman filter

0 引言

随着城市现代化的不断发展, 市区全球定位系统 (global positioning system, GPS) 信号受到日益增多的高层建筑和立体式交通的影响, 多路径效应和遮挡严重, 无法保证稳定的定位精度和可靠性; 航位推算 (dead reckoning, DR) 系统采集车辆运动传感器信息进行独立连续的导航, 但由于传感器和计算误差随时间不断累积, 因此, 只能保证短时间的定位精度。数字地图匹配 (map matching, MM) 是提高定位精度非常有效的手段, 但只有在拐弯处才能提供与地图精度相当的修正信息, 且当匹配前原始位置信息偏差较大时, MM 很难匹配出正确的位置。因此, 单一系统或简单的组合均难以胜任城市中车辆高精度的导航定位,

即存在一定范围的导航“盲区”。

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信的开放性全球规范, 具有抗干扰、低功耗、点对多点连接、语音和数据混合传输等优点^[1]。将蓝牙技术应用于城市车辆导航, 通过布置一定数量的蓝牙路标 (bluetooth beacon, BB) 传感器进行车辆的精确定位, 是本文实现城区无“盲区”高精度导航定位的关键。

传感器及定位信息的增加能够提高车辆导航的精度和观测信息的冗余度, 如何有效融合多组传感器信息是决定最终性能的关键。本文分析了新型 BB 传感器定位原理及结构设计, 研究了 GPS/DR/BB/MM 多信息融合原理及算法, 最后, 通过跑车结果分析, 验证方案具有很高的定位精

收稿日期: 2005-06-29

* 基金项目: 香港特别行政区政府资助项目 (Poly U - YC43)

度和实用性。

1 BB 传感器定位原理与设计

路标传感器是一种无线电信标 (sign post), 由发射和接收装置两部分组成, 为达到定位的目的, 必须使发射和接收信号在某一特定的范围之内有效。新兴的短距离无线蓝牙通讯技术的出现, 为实现城市导航“盲区”车辆的精确定位提供了可能。利用 BB 传感器实现车辆的精确定位, 是基于路标和车载单元中嵌入式主从蓝牙模块 (Bluetooth module) 间无线通讯进行的, 具体定位原理如图 1 所示。

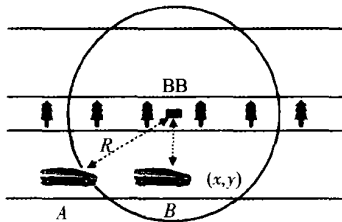


图 1 蓝牙路标传感器定位原理

Fig 1 Principle of bluetooth beacon sensor positioning

设 BB 有效作用范围为半径 R 的圆, 路标存储道路中心的精确的位置坐标为 (x_0, y_0) 。当车驶至路标有效作用区域 (A 点) 时, 两模块间开始试图建立通讯, 直至车行驶到 B 点时通讯建立完毕, 车辆完成精确的位置校正, 即, $x = x_0, y = y_0$ 。 (x, y) 为最终输出的车辆经纬度位置信息。

根据 BB 定位原理, 本文实现的新型 BB 传感器及通讯结构如图 2 所示。

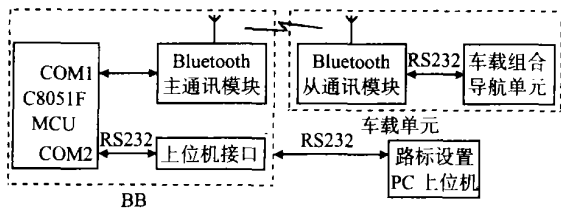


图 2 蓝牙路标传感器及通讯结构框图

Fig 2 Structure diagram of bluetooth beacon sensor and communication

BB 主要包括 C8051F 单片机和蓝牙主通讯模块 (master module) 两部分^[2]。C8051F 单片机作为路标传感器的主控芯片, 硬件配置其两路 UART 串口资源中 COM1 口连接主蓝牙模块, 并控制与车载单元中从蓝牙模块 (slave module) 之间的通讯链路建立和定位信息的通讯; COM2 口扩展为上位机接口, 用于接收 PC 上位机的路标位置参数设定信息。根据选用的蓝牙模块的不同, 蓝牙主从模块间通讯距离也有所差异。本文选取有效通讯距离为 10 m 的蓝牙模块, 通过 BB 位置校正后, 组合定位误差可确保在 10 m 以内。

2 GPS/DR/MM/BB 组合导航原理

引入 BB 后, 新型城市车辆组合导航系统中包括了 4 个子系统, 即 GPS/航位推算/地图匹配/BB 辅助定位系统。为有效融合各子系统导航信息, 下面研究了城市车辆 GPS/DR/MM/BB 四组合导航定位原理, 组合原理框图如图 3 所示。

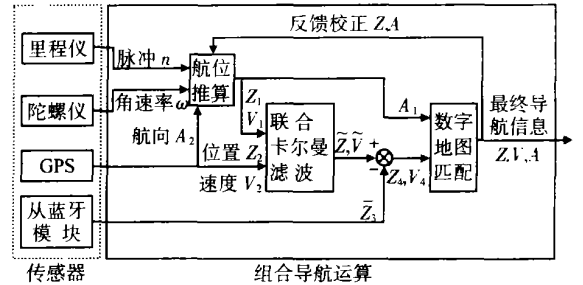


图 3 GPS/DR/MM/BB 组合原理框图

Fig 3 Block diagram for integrated GPS/DR/MM/BB

首先, DR 系统采集车辆里程仪的脉冲信息 n 和陀螺仪角速率 ω , 计算获得车辆的位置 Z_1 、速度 V_1 和航向 A_1 。当城区 GPS 信号稳定有效时, 输出精确的航向信息 A_2 修正 DR 航向, 并与 DR 导航信息进行最优滤波组合, 估计出车辆的位置 \tilde{Z} 和速度 \tilde{V} 。GPS/DR 组合信息进行数字地图匹配后, 获得最终的位置 Z 、速度 V 和航向 A , 同时, 反馈位置和航向信息给 DR 系统校正累积误差^[3]。组合运算过程中, 一旦接收到蓝牙路标传感器发送的精确位置信息, 直接对 GPS/DR 的组合位置信息进行校正。

3 组合算法研究

从 GPS/DR/MM/BB 组合原理分析可知, GPS/DR 最优组合是本文研究的多传感器信息融合算法的核心。目前, 车辆导航系统中常用的 GPS/DR 组合包括加权平均、集中卡尔曼滤波和联合卡尔曼滤波 3 种方法。由于城市中 GPS 接收可靠性较低, 定位精度差异很大, 因此, 采用简单的加权平均或者一般集中式卡尔曼滤波算法无法实现 GPS 与 DR 信息的最优组合, 甚至会引入 GPS 的粗差, 严重影响定位精度, 下文主要研究了自适应联合卡尔曼滤波算法在城市高精度车辆导航系统中的应用。

3.1 联合卡尔曼滤波算法

在多传感器的组合导航系统中, 如采用单滤波器来融合所有传感器信息, 则任何一个传感器或子系统的故障都可能影响整个组合系统。Carlson 于 1987 年提出了基于信息分配原则的联合滤波 (federated filter) 算法。对应于各个传感器构成若干个子系统, 由于滤波器 (local filter, LF) 进行独立的并行处理。再利用一个主滤波器 (master filter, MF) 对各个子系统的信息进行融合。

子系统估计和全局估计之间的关系按以下融合算法确定

$$\begin{cases} P_g^{-1}(k) = \sum_{i=1}^{n+m} P_i^{-1}(k) \\ \hat{X}_g(k) = P_g(k) \sum_{i=1}^{n+m} P_i^{-1}(k) \hat{X}_i(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中 \hat{X}_g 和 P_g 为系统组合的全局估计和协方差阵, \hat{X}_i 和 $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是子滤波器 i 的状态估计和协方差阵。其中, 主滤波器的信息通过信息分配因子 β_i 分配到各子滤波器和主滤波器, 即

$$\begin{cases} P_i^{-1}(k) = \beta_i P_g^{-1}(k) \\ \hat{X}_i(k) = \hat{X}_g(k) \quad (i = 1, 2, \dots, n+m) \\ Q_i^{-1}(k) = \beta_i Q_g^{-1}(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $Q_g, Q_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 分别为系统组合和子滤波器 i 的噪声方差阵。

信息分配满足信息守恒原理, 即 $\sum_{i=1}^{n+m} \beta_i = 1$ 。通过自适应调整 β_i , 即可形成自适应的联合卡尔曼滤波系统, 使其性能具有更好的适应性。

3.2 GPS/DR 联合卡尔曼滤波器设计

限于城市的交通状况, 车辆一般视为低动态运动载体, 因此, 可采用相对简单的匀速模型 (constant velocity, CV) 作为车辆的动态模型, 即对车辆用位置、速度以及噪声组成的参数来描述^[4]。

采用 CV 模型后, GPS/DR 联合卡尔曼滤波器的状态变量选取为

$$x_g = [x, v_x, y, v_y]^T \quad (3)$$

式中 x, y, v_x, v_y 分别为车辆沿东向和北向的位置、速度分量。

车辆运动的系统方程建立如下

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v}_x \\ \dot{y} \\ \dot{v}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v_x \\ y \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{t_x} \\ 0 \\ \omega_{t_y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $\omega_{t_x}, \omega_{t_y}$ 分别为 $(0, \sigma_{t_x}^2)$ 和 $(0, \sigma_{t_y}^2)$ 的高斯白噪声。

对于 DR 航位推算子系统 (LF1), 取其系统状态变量 $X_1 = X_g$, 系统方程同总体系统方程, 其外观测量为压电晶体陀螺输出角速率 ω 和车辆里程仪输出的在采样周期 T 时间内行驶的距离 s , 观测方程为

$$Z_1(t) = h_1[t, X(t)] + V_1(t) \quad (5)$$

即

$$Z_1 = \begin{bmatrix} \omega \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \left[\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \right] \\ \Psi T \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_\omega \\ \varepsilon_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 Ψ 为里程仪标定因子; ε_ω 为陀螺仪漂移误差中的高斯白噪声, 为 $(0, \sigma_\omega^2)$ 的高斯白噪声; ε_s 为里程仪输出量的观测白噪声, 为 $(0, \sigma_s^2)$ 的高斯白噪声。

观测式 (6) 显然为非线性方程, 为应用标准卡尔曼滤波方程, 必须进行线性化处理。通常, 首先, 对 $h_1[t, X(t)]$ 进行离散化, 然后, 将 $h_1[k, X(k)]$ 在 $\hat{X}(k, k-1)$ 附近展开为泰勒级数, 并保留一阶小量即可。

对于 GPS 定位子系统 (LF2), 取其系统状态变量 $x_2 = x_g$, 系统方程同总体系统方程, 外观测量为 GPS 接收机输出的车辆位置在东向和北向位置分量 x_{obs}, y_{obs} , 观测方程可表示为

$$Z_2(t) = H_2(k) X_2(k) + V_2(k) \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} Z_2(k) &= \begin{bmatrix} x_{obs}(k) \\ y_{obs}(k) \end{bmatrix}, H_2(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ V_2(k) &= \begin{bmatrix} \omega_x(k) \\ \omega_y(k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\omega_x(k)$ 和 $\omega_y(k)$ 分别对应为 $(0, \sigma_x^2)$ 和 $(0, \sigma_y^2)$ 的高斯白噪声。

3.3 信息分配因子自适应算法

针对城市中 GPS 接收不可靠, 定位精度随干扰影响的大小存在很大差异, 研究了联合卡尔曼滤波信息分配因子自适应算法, 即根据 GPS 接收状况, 自适应调节信息分配因子 β_2 来配置 GPS 信息在联合卡尔曼滤波中的权重, 优化 GPS 与 DR 信息组合性能^[5]。

以本文研究使用的 GARMIN GSP 接收机为例, 输出参数中水平精度因子 (horizontal dilution of precision, HDOP) 值用来反映 GPS 定位品质, HDOP 愈小, GPS 定位精度愈高。通常, 当 HDOP 值小于 4 时, GPS 具有基本理想的定位精度, 定位误差 $E < 20\text{m}$; 当 HDOP 值小于 1 时, GPS 具有很高的定位精度, $E < 10\text{m}$; 一旦 GPS HDOP 值大于 4, 定位精度难以得到保证, 误差甚至达到数百米。根据 GPS HDOP 值与定位精度的经验模型, 设计的信息分配因子自适应算法为

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 1 - \beta_2 \\ \beta_2 &= \begin{cases} 0.99 & (\text{HDOP} \leq 1) \\ 2/\text{HDOP} & (1 < \text{HDOP} < 4) \\ 1/4\text{HDOP} & (4 \leq \text{HDOP}) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

4 综合试验

为进一步验证基于多传感器信息融合车辆导航定位性能,对原理样机在南京、广州、沈阳和香港等多个城市进行了大量的跑车试验,下面主要对香港的跑车试验结果进行分析。

试验采用 GARMIN GPS 接收机,ENV-5 型压电晶体陀螺仪,里程仪信号取自香港理工大学的 Honda 试验车,利用 IBM 笔记本进行 GPS/DR/BB 组合数据的采集和数字地图显示。路线从香港理工大学出发,沿红磡→中区海底隧道→铜锣湾→湾仔→中环,最后至上环。图 4 反映了试验过程中 GPS 受到城市高层建筑及立交等影响,HDOP 值剧烈变化情况,试验过程中,根据式(8)自适应调节 GPS 信息分配因子 β_2 值大小。

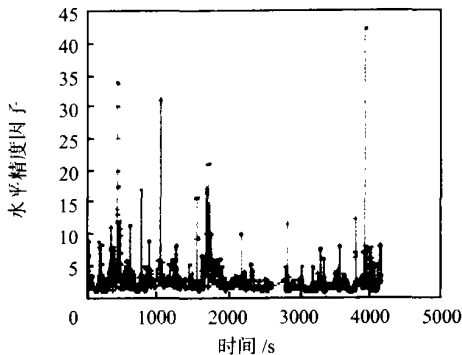


图 4 香港跑车试验 GPS HDOP 变化情况

Fig 4 Curve of GPS HDOP in Hong Kong field test

试验中,香港岛湾仔段 GPS 接收状况较差,利用 GPS/DR 自适应联合卡尔曼滤波组合后定位结果如图 5 所示。

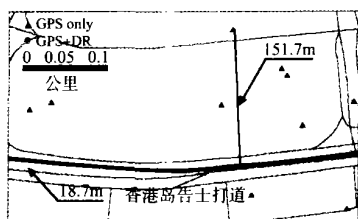


图 5 湾仔段 GPS/DR 组合定位结果

Fig 5 Vehicle positioning result with GPS/DR integration in Wan Zai, HK

分析表明:此段 GPS 几乎无法提供有效的定位,定位点发散严重,误差最高达 151.7 m。采用 GPS/DR 自适应联合卡尔曼滤波组合后,车辆定位精度得到显著提高,最大定位误差有效降低至 18.7 m。

试验过程中,车辆经过全长约 1.9 km 的九龙半岛-港岛中区海底隧道,DR 误差不断累积,为验证 GPS/DR/BB 组合效果,在隧道出口处布置 BB 进行误差修正,表 1 为 BB

校正前后定位结果和误差分析。

表 1 BB 位置校正试验结果

Tab 1 Result of position correct test with bluetooth beacon

组合方式	定位结果		定位误差 (m)
	经度(°)	纬度(°)	
GPS/DR	114.17966	22.28130	37.93
	114.17956	22.28127	38.27
	114.17950	22.28124	38.81
GPS/DR/BB	114.17955	22.28079	7.85
	114.17951	22.28077	8.23
	114.17948	22.28075	8.31

试验结果表明:本文研究的新型 BB 传感器可精确校正系统定位误差,GPS/DR/BB 组合定位能够有效弥补城市中车辆定位精度和可靠性的不足,确保车辆全程较高精度的导航定位,组合结果进一步经过 MM 后,可完全匹配到行驶道路中,从而提供更高的定位精度($E < 10$ m)。

5 结束语

本文研究了新型 BB 传感器及 GPS/DR/MM/BB 多信息融合技术,建立了基于自适应联合卡尔曼滤波的 GPS/DR 组合算法。实际跑车试验结果达到了理想的导航精度,验证了 BB 传感器定位和多传感器信息融合算法是可行的,能够有效地提高城市车辆导航定位的性能和可靠性,符合高精度导航定位要求。

参考文献:

- [1] Bruno R, Conti M, Gregori E. Bluetooth: architecture, protocols and scheduling algorithms[J]. Kluwer Cluster Computing, 2002, 5(2): 117-131.
- [2] 熊 慧,刘建业,孙永荣. 基于蓝牙技术的微型车辆导航系统[J]. 计算机与现代化, 2003, (10): 51-53.
- [3] Chen Wu, Yu Meng, Li Zhi-lin, et al. Tight integration of digital map and in-vehicle positioning unit for car navigation in urban Areas[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003, 8(2B): 551-556.
- [4] 柏 钢,万德钧,王 庆,等. 联合卡尔曼滤波在 GPS/DR 车辆导航系统中的应用[J]. 东南大学学报, 1999, 29(2): 23-27.
- [5] 房建成,李学恩,申功勋,等. 市区车辆 GPS/DR 组合导航系统的研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 84-89.

作者简介:

沈雪松(1980-),男,江苏泰州人,南京航空航天大学自动化学院博士研究生,香港理工大学土木及结构工程学系研究助理,主要从事车辆导航与测量控制技术研究。