

文章编号: 1001-0920(2009)03-0398-05

路网辅助的车载 INS/ GPS 组合导航方法

徐田来, 崔平远, 崔祜涛

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对车载 INS/ GPS 组合导航系统在 GPS 无效时精度迅速下降的问题, 提出了将车辆行驶的路网约束作为虚拟传感器, 采用多传感器数据融合的方式, 与 INS 和 GPS 组成 INS/ GPS/ 路网组合导航系统. 当 GPS 失效时, 使用路网辅助 INS. 仿真结果表明, 在 GPS 无效时间段, 该方法能有效减小系统定位误差.

关键词: 组合导航; 数据融合; 路网辅助; 地图匹配; 惯性导航系统/ 卫星定位系统

中图分类号: TN967.2

文献标识码: A

Method of land vehicle INS/ GPS integrated navigation aided by road network constrains

XU Tian-lai, CUI Ping-yuan, CUI Hu-tao

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: XU Tian-lai, E-mail: xutianlai@hit.edu.cn)

Abstract: The positioning error of INS/ GPS will increase gradually during GPS outages. Therefore, a method of enhancing INS/ GPS is presented. The road network constraints of land vehicle, regarded as a virtual sensor, are combined with INS and GPS to construct INS/ GPS/ road-network-constrains integrated navigation system by using methods of multi-sensor data fusion. Simulation results show that the proposed method can reduce the positioning error effectively during GPS outages.

Key words: Integrated navigation system; Data fusion; Road network constrains; Map matching; INS/ GPS

1 引言

惯性导航系统 (INS) 能完全自主地提供全面的导航信息, 但其误差会随着时间不断积累. 全球卫星定位系统 (GPS) 定位范围广、精度高, 其缺点是容易发生信号遮挡及干扰. INS/ GPS 组合导航系统能充分发挥这两个系统的优点^[1]. 然而, 这种组合导航系统长时间运行的精度仍然更多地依赖于 GPS, 当 GPS 受到干扰或 GPS 卫星信号不能覆盖而失效时, 由于 INS 误差随时间积累且得不到校正, 系统精度将会迅速降低, 依赖于 GPS 导航是不可靠的. 因此, 有必要使用其他的导航传感器辅助 INS, 如 INS/ 电子地图^[2]、INS/ 里程计^[3]、INS/ 运动学约束^[4]等, 以提高系统在 GPS 无效时间段的精度.

随着计算机技术的迅猛发展, 以数字地图为基础的地理信息系统已成为陆地车辆导航系统的一个重要组成部分. 采用地图匹配技术 (MM) 不仅能反

映车辆实时位置信息, 而且能改善组合导航系统的定位精度^[5,6]. 文献[7]使用地图匹配辅助 DR/ GPS 系统, 在 GPS 不可用的情况下, 仍取得了误差 8 m, 最大误差 19 m 的定位精度.

地图匹配方法在沿道路方向的误差修正能力是有限的, 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. 文献[8]使用模型预测的位置和 MM 得到的位置, 按方差最小准则进行组合, 得到沿道路方向的误差, 但该方法假设模型预测误差和地图匹配误差都为零均值噪声, 这在实际中很难满足.

本文在地图匹配的基础上, 提出一种路网辅助车载 INS/ GPS 方法, 将路网提供的信息作为一个虚拟传感器的测量, 与 INS 和 GPS 共同构成多传感器车载组合导航系统, 使得在 GPS 无效的时间段,

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-05-30.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA12Z305); 国家自然科学基金项目 (60774065).

作者简介: 徐田来 (1979—), 男, 山东莒南人, 博士生, 从事组合导航、数据融合的研究; 崔平远 (1961—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 从事飞行器动力学、自主导航等研究.

仍可利用路网的测量对 INS 误差进行校正,提供高精度的车辆导航定位.

2 INS /GPS 系统数学模型

2.1 系统状态方程

取 INS 误差方程作为组合导航系统的状态方程.车辆在高程上变化较小,因此忽略高度通道.系统状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = F(t) X(t) + w(t). \tag{1}$$

其中

$$X = [\phi \quad V \quad r \quad b \quad r \quad \nabla]_{15 \times 1}^T$$

为系统状态变量,包括三维姿态角误差 $\phi = [\phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U]$,二维速度误差 $V = [V_E \quad V_N]$,二维位置误差 $r = [r_x \quad r_y]$,三维陀螺常值漂移分量 $b = [b_x \quad b_y \quad b_z]$,三维陀螺马尔科夫漂移分量 $r = [r_x \quad r_y \quad r_z]$,二维加速度计零偏分量 $\nabla = [\nabla_x \quad \nabla_y]$,共 15 个状态变量.式中:下标 E, N, U 分别表示东北天坐标系下 3 个轴向; x, y, z 分别表示体坐标系下 3 个轴向; $F(t)$ 为系统动态矩阵; $w(t)$ 为系统噪声,认为是高斯白噪声,且

$$F = \begin{bmatrix} F_N & F_S \\ 0_{8 \times 7} & F_M \end{bmatrix}_{15 \times 15} \tag{2}$$

其中 F_N 为对应 INS 系统 7 个基本导航参数的系统阵,详细推导见文献[9];

$$F_S = \begin{bmatrix} C_b^n & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & [C_b^n]_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 3} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}_{7 \times 8} \tag{3}$$

式中: C_b^n 表示体坐标系到地理坐标系的坐标变换矩阵, $[C_b^n]_{2 \times 2}$ 表示由 C_b^n 的前两行前两列构成的 2×2 方阵;

$$F_M = \text{Diag}\{0 \quad 0 \quad 0 \quad -1/T_{rx} \quad -1/T_{ry} \quad -1/T_{rz} \quad 0 \quad 0\} \tag{4}$$

式中 T_{rx}, T_{ry}, T_{rz} 分别为 3 个轴向陀螺时间常数.

2.2 GPS 观测模型

利用惯导系统给出的位置和速度信息与 GPS 系统相应的量测信息之差作为外部观测测量,将观测误差归入观测噪声,可得系统量测方程^[9]

$$Z_{GPS}(t) = H_{GPS}(t) X(t) + v_{GPS}, \tag{5}$$

其中

$$Z_{GPS} =$$

$$[INS - GPS \quad INS - GPS \quad V_{EINS} - V_{EGPS} \quad V_{NINS} - V_{NGPS}]^T$$

式中: ϕ, λ, V_E, V_N 分别表示纬度、经度、东向速度、北向速度;下标 INS 和 GPS 分别表示 INS 和 GPS 的测量值.

观测矩阵为

$$H_{GPS}(t) = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} & I_2 & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 3} & I_2 & 0_{2 \times 10} \end{bmatrix}_{4 \times 15} \tag{6}$$

观测噪声为 v_{GPS} ,这里认为是零均值高斯白噪声.

3 路网辅助 INS 方法

3.1 地图匹配方法

地图匹配方法可在不增加额外硬件的情况下,仅通过增加电子地图软件及相应匹配算法软件,便可提高系统的定位精度.地图匹配从原理上可解释为两个独立的过程^[6]: 1) 找到车辆当前最有可能的行驶路段; 2) 将车辆定位到该行驶路段上的某一点.

当 GPS 不可用时,可用地图匹配的方法辅助 INS.常用的方法是首先获取 INS 定位数据,并确定误差区域,将该区域内的所有道路作为候选道路,依据道路匹配算法确定最佳匹配路段;然后将车辆定位到最佳匹配路段上.如果地图匹配的精度足够高,则可将此时车辆的位置信息反馈给 INS 系统,作为下一时刻的初始位置.道路匹配准则包括^[5]:

- 1) 最近道路原则,即将车辆定位到距离最近的道路上;
- 2) 方位匹配原则,即道路与车辆行驶方向大致相同;
- 3) 路段的逻辑联通性;
- 4) 转弯的合理性;
- 5) 车辆转弯角度与道路转弯角度的相近性.

确定误差区域常用的方法是根据概率准则获得一个误差椭圆,即该误差椭圆以一定的概率包含车辆的实际位置.设组合导航状态误差协方差阵为 P_k ,其中经度误差、纬度误差及其互协方差变换为米制单位后分别为 σ_E^2, σ_N^2 和 σ_{EN}^2 ,则误差椭圆的参数为^[5]

$$a = \sqrt{\lambda_0 / 2 (\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sqrt{(\sigma_E^2 - \sigma_N^2)^2 + 4 \sigma_{EN}^2})} \tag{7}$$

$$b = \sqrt{\lambda_0 / 2 (\sigma_E^2 + \sigma_N^2 - \sqrt{(\sigma_E^2 - \sigma_N^2)^2 + 4 \sigma_{EN}^2})} \tag{8}$$

$$\vartheta = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \arctan \frac{2 \sigma_{EN}}{\sigma_N^2 - \sigma_E^2} \tag{9}$$

其中: a 为椭圆的长半轴, b 为椭圆的短半轴, ϑ 为椭圆长半轴与北向的夹角, λ_0 为扩展因子.

3.2 路网辅助方法

上节所述地图匹配方法无法对 INS 内部状态误差(速度误差、姿态误差等)进行校正,且该方法对沿道路方向误差修正能力有限,只有在拐弯处才能提供与地图精度相当的修正信息.为此,本文提出一种路网辅助 INS 的方法,在地图匹配的基础上,将路网提供的道路约束信息作为一个虚拟传感器的测量,与 INS 构成数据融合系统.

该方法中最佳匹配路段选择与3.1节MM方法一致,但将车辆定位到该行驶路段的方法则不同. MM方法将车辆定位到行驶路段上,仅利用了测量位置与行驶路段间的几何关系,而本文将路网约束作为虚拟传感器,与INS组成数据融合系统,这样不仅考虑了测量位置与行驶路段间的几何关系,而且利用了惯导系统的误差模型.

忽略道路高低起伏的影响,设 $P_1(E_1, N_1)$ 到 $P_2(E_2, N_2)$ 路段为由最佳匹配路段方法确定的当前车辆的行驶道路, O 为车辆真实位置, $P_{INS}(E_{INS}, N_{INS})$ 为INS的位置测量,其东向和北向位置误差分别为 E 和 N , P_M 为 P_{INS} 在路段上的投影,如图1所示.

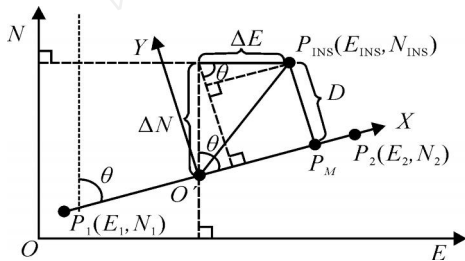


图1 车辆真实位置与测量位置关系

在图1中, EON 表示导航坐标系, E 为东向, N 为北向; XOY 为道路坐标系, X 为车辆前行的道路方向; L 为道路方向与北向的夹角; E 和 N 与以弧度表示 L 的关系为

$$E = R \cos L, \quad N = LR. \quad (10)$$

其中: R 为地球半径, L 为当前纬度.

当车辆在 P_1 到 P_2 路段上行驶时,据此路网约束可计算出INS测量值在垂直道路方向的误差 D

$D = |P_{INS} P_M|$, 它与组合导航系统状态变量的关系为

$$D = N \sin L - E \cos L = LR \sin L - R \cos L \cos L = [0_{1 \times 8} \quad R \sin L \quad -R \cos L \cos L \quad 0_{1 \times 8}] X + v_{road}. \quad (11)$$

其中

$$D = |P_{INS} P_M| = \frac{|P_1 P_{INS} \times P_1 P_2|}{2 |P_1 P_2|} = \frac{E_{INS}(N_1 - N_2) - N_{INS}(E_1 - E_2) + (E_1 N_2 - E_2 N_1)}{\sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (N_1 - N_2)^2}}$$

$$\cos L = \frac{P_1 P_2 \cdot j}{|P_1 P_2|} = \frac{N_2 - N_1}{\sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (N_1 - N_2)^2}}$$

$$\sin L = \frac{P_1 P_2 \cdot i}{|P_1 P_2|} = \frac{E_2 - E_1}{\sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (N_1 - N_2)^2}}$$

式中: P_1, P_2 和 P_{INS} 都是坐标已知点,“/ /”表示向量的长度,符号“ \times ”和“ \cdot ”分别表示向量的向量积和数量积, i 和 j 分别表示 EON 坐标系下 OE 轴和 ON 轴的单位向量.

路网辅助惯导系统状态方程同式(1),观测方程为

$$Z_{road} = H_{road} X + v_{road}. \quad (12)$$

其中:观测矩阵为

$$H_{road} = [0_{1 \times 8} \quad R \sin L \quad -R \cos L \cos L \quad 0_{1 \times 8}]_{1 \times 15}, \quad (13)$$

观测量为

$$Z_{road} = \frac{E_{INS}(N_1 - N_2) - N_{INS}(E_1 - E_2) + (E_1 N_2 - E_2 N_1)}{\sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (N_1 - N_2)^2}}. \quad (14)$$

观测噪声为 v_{road} , 认为是零均值高斯白噪声.

4 系统整体结构

将路网提供的道路约束信息作为一个虚拟传感器的测量,与INS和GPS共同构成车载组合导航系统,系统结构如图2所示.

该系统在原INS/GPS组合系统的基础上,无需增加额外传感器,仅通过增加路网数据及相应算法模块,便可实现一个虚拟传感器测量,进而与INS和GPS组成数据融合系统.即使在GPS无效时间段内,由于有路网辅助INS,构成INS/路网组合导航系统,可充分利用路网约束条件和INS误差量间的耦合关系,仍能保持较高的定位精度.

对于INS/GPS/路网组合导航系统,式(1),(5)和(12)线性化及离散化后模型如下:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1}, \\ Z_k^{(i)} = H_k^{(i)} X_k + V_k^{(i)}, \quad i = 1, 2. \end{cases} \quad (15)$$

其中: X_k 为系统状态向量, $Z_k^{(i)}$ 为测量向量,上标 $i = 1$ 表示INS/GPS子滤波器的测量, $i = 2$ 表示INS/路网子滤波器的测量, $H_k^{(i)}$ 为量测矩阵, Φ_{k-1} 为系统噪声矩阵, W_{k-1} 为系统噪声向量, $V_k^{(i)}$ 为量测噪声向量.这里 $W_{k-1}, V_k^{(1)}$ 和 $V_k^{(2)}$ 是互不相关的高斯白噪声序列, W_k 的协方差阵为 Q , $V_k^{(i)}$ 的协方差阵为 $R^{(i)}$.

INS/GPS子滤波器和INS/路网子滤波器按Kalman公式独立进行时间更新和量测更新,分别得到状态估计值 $X^{(1)}, X^{(2)}$ 和误差协方差阵 $P^{(1)}, P^{(2)}$.融合主滤波器和两个子滤波器的联邦滤波算法如下^[10]:

$$(P^{(G)})^{-1} = (P^{(1)})^{-1} + (P^{(2)})^{-1} + (P^{(m)})^{-1}, \quad (16)$$

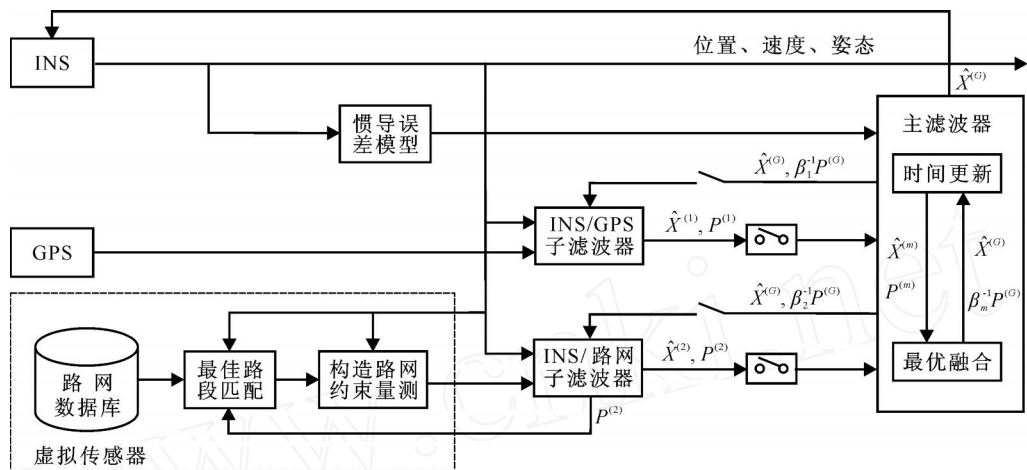


图 2 INS/ GPS/ 路网组合导航系统整体结构

$$\hat{X}^{(G)} = P^{(G)} [(P^{(1)})^{-1} \hat{X}^{(1)} + (P^{(2)})^{-1} \hat{X}^{(2)} + (P^{(m)})^{-1} \hat{X}^{(m)}] \quad (17)$$

其中： $\hat{X}^{(m)}$ 和 $P^{(m)}$ 分别表示主滤波器的状态估计及协方差， $\hat{X}^{(G)}$ 和 $P^{(G)}$ 分别表示全局的状态估计及协方差。

完成一次信息融合后，按信息分配因子对每个子滤波器进行重置，重置过程如下：

$$\begin{cases} \hat{X}^{(i)} = \hat{X}^{(G)}, P^{(i)} = \beta_i^{-1} P^{(G)}, \\ Q^{(i)} = \beta_i^{-1} Q, i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (18)$$

分配系数满足信息守恒原理，即

$$\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_m = 1. \quad (19)$$

实际工作中，若 GPS 系统受较大干扰或遮挡，则导致 GPS 无输出或输出不正确，即此时在滤波过程中将没有 $z^{(1)}$ 观测或观测不正确。为保证滤波过程正常进行，将 β_1 置为 0，断开 INS/ GPS 子滤波器。同理，若车辆未行驶在路网数据库记录的道路上或无法确定最佳匹配路段，则导致路网约束不可使用。此时将 β_2 置为 0，INS/ 路网子滤波器将被断开。若 GPS 与路网约束都不可用，则将 β_1 和 β_2 都置为 0， β_m 变为 1，即 INS 误差估计完全依赖于 INS 误差模型。

5 仿真研究

为验证 INS/ GPS/ 路网组合导航系统的实用性，尤其是 GPS 失效一段时间系统的精度，使用跑车数据对其进行离线仿真验证。实验设备包括 GPS 一套，INS 一套，差分 GPS 一套，相应的数据采集设备。GPS 精度 10 m，输出频率 1 Hz；INS 中陀螺常值漂移 1°/h，随机漂移 0.1°/h，加速度计零偏 10^{-4} g；差分 GPS 精度小于 1 m，其测量值作为车辆真实值。

跑车时间共 3722 s，车辆由起始点出发后最终回到起始点。为了模仿 GPS 失效情况，仿真过程中从 600 ~ 1800 s 和 2400 ~ 3600 s 两个时间段，关掉 GPS 数据输入，GPS 失效每次持续 1200 s。跑车轨迹

如图 3 所示。为了简化表示，以 INS/ GPS + MM 表示 INS/ GPS 组合后再用路网进行地图匹配的方法；以 INS/ GPS/ 路网表示以路网约束作为虚拟传感器构成 INS/ GPS/ 路网组合导航系统的方法。INS/ GPS + MM 方法中每 10 s 进行一次地图匹配；INS/ GPS/ 路网方法中每 10 s 进行一次路网辅助。

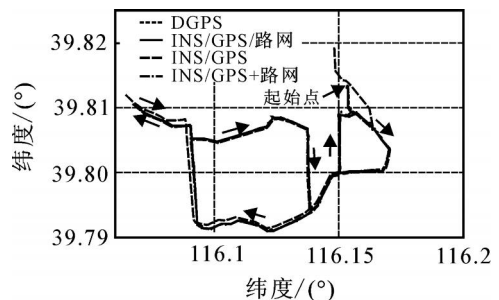


图 3 跑车轨迹

从图 3 可以看出，当 GPS 可用时，INS/ GPS 系统精度较高，其轨迹与真实轨迹基本一致；当 GPS 不可用时，INS/ GPS 系统误差随时间逐渐增大，偏离真实轨迹越来越远，直到 GPS 再次可用时，误差才被校正。GPS 的无效时间较长，每次达 1200 s，因此 INS/ GPS 系统误差较大。在 GPS 被关闭的时间段内，INS/ GPS + MM 方法和 INS/ GPS/ 路网组合方法的计算轨迹都与真实轨迹基本重合。这是因为这两种方法利用了车辆在路网中行驶的约束，都能将车辆定位到路网中。

当 GPS 不可用时，INS/ GPS 误差增长较快，如图 4 所示。INS/ GPS + MM 方法由于增加了 MM 方法，在 GPS 失效 1200 s 的情况下，精度比 INS/ GPS 方法提高明显；INS/ GPS/ 路网方法由于采用数据融合方式，充分利用 INS 误差间的耦合关系，比 INS/ GPS + MM 方法定位精度更高。

不同方法间的速度误差对比如图 5 所示。在 GPS 失效时间段，INS/ GPS 速度误差较大，而

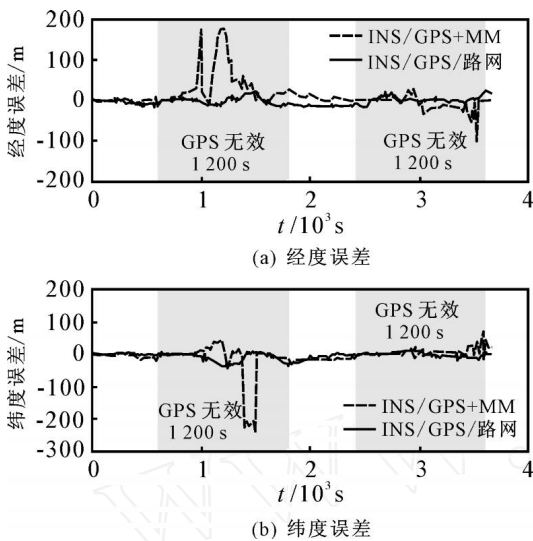


图4 INS/GPS/路网系统位置误差

INS/GPS/路网方法速度误差维持在较小的程度。INS/GPS+MM方法只是把经地图匹配后的位置反馈作为下一时刻的初值,且反馈的时间间隔较大,因此无法进行速度误差校正。

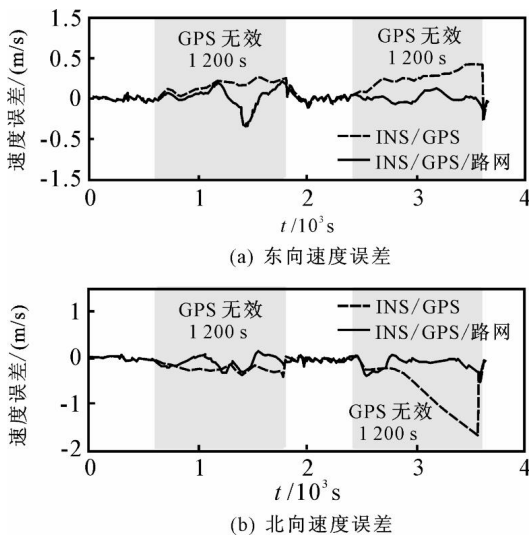


图5 INS/GPS/路网系统速度误差

6 结论

本文提出将路网约束作为一个虚拟传感器,采用多传感器数据融合的方式,组成INS/GPS/路网组合导航系统的方法。当GPS失效时,使用路网辅助INS,可以抑制INS误差发散,并将误差保持在较小程度,提高了系统的精度。该方法在已有INS/GPS组合系统的基础上,无需增加额外传感器硬件,仅通过增加路网数据库及相应算法模块,便可实现INS/GPS/路网组合导航系统,达到提高原系统在GPS失效时定位精度的目标,是一种简单可行的方法。

参考文献(References)

- [1] 黄晓瑞. 基于信息融合的车载组合导航系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
(Huang X R. Development of vehicle integrated navigation system based on information fusion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.)
- [2] Basnayake C, Mezentsev O, Lachapelle G, et al. An HSGPS, inertial and map-matching integrated portable vehicular navigation system for uninterrupted real-time vehicular navigation[J]. Int J of Vehicle Information and Communication Systems, 2005, 1(1/2): 131-151.
- [3] 缪玲娟, 李春明, 郭振西, 等. 陆用捷联惯导系统里程计自主式组合导航技术[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(9): 808-811.
(Miao L J, Li C M, Guo Z X, et al. Independently integrated navigation system of SINS and distance-transfer unit for land vehicles[J]. J of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(9): 808-811.)
- [4] Godha S, Cannon M E. Integration of DGPS with a low cost MEMS-based inertial measurement unit (IMU) for land vehicle navigation application [C]. ION GPS-05. Long Beach, 2005: 1-13.
- [5] Yu M. Improved positioning of land vehicle in ITS using digital map and other accessory information[D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2005: 93-137.
- [6] Zhao Y L. Vehicle location and navigation systems[M]. Norwood: Artech House, 1997.
- [7] Yu M, Li Z L, Chen Y Q, et al. Improving integrity and reliability of map matching techniques [J]. J of Global Positioning Systems, 2006, 5(1/2): 40-46.
- [8] 谢彩香, 林宗坚, 刘召芹, 等. GPS/DR/MM组合导航中的车辆定位精度研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 74-76.
(Xie C X, Lin Z J, Liu Z Q, et al. Research on the accuracy of vehicle location in GPS/DR/MM integrated navigation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(1): 74-76.)
- [9] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
(Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Theory of Kalman filter and integrated navigation[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 1998.)
- [10] 荣军, 邱恺, 黄世超. 一种改进的联邦滤波算法及其应用研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 497-500.
(Rong J, Qiu K, Huang S C. An improved federated filtering algorithm and its application[J]. Chinese J of Sensor and Actuator, 2006, 19(2): 497-500.)