

车载 GPS 组合测速系统数据融合算法研究

陶玉贵

(东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:设计并建立了车载 GPS/加速度计组合测速系统联合 Kalman 滤波数学模型。提出了一种自适应联合 Kalman 滤波方法及其算法,运用随机线性离散系统 Kalman 滤波和非线性离散系统扩展 Kalman 滤波等技术进行数据的更新滤波。理论分析和半物理仿真结果表明,该数据融合算法在测量精度、可靠性、适应性、实时性等方面大大提高了该组合测速系统的性能。

关键词:GPS; 加速度计; 数据融合; Kalman 滤波

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)01-0200-04

Study on Data Fusion Algorithm for GPS Integrated Vehicle Velocity Testing System

TAO Yu-gui

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A mathematical model of the federated Kalman filter for GPS/accelerometer integrated vehicle velocity testing system was designed and established. Presents an adaptive federated Kalman filtering method and algorithm, the techniques such as the Kalman filtering of random linear discrete system and the extended Kalman filtering of nonlinear discrete system were used to update filtering of data. Theoretical analysis and semi-physical simulation results demonstrated that the data fusion algorithm greatly improves the performance of the integrated vehicle velocity testing system in measuring accuracy, reliability, adaptivity and real-time processing rate.

Key words: GPS; accelerometer; data fusion; Kalman filtering

0 引言

全球定位系统(GPS)是美国国防部研制的第二代卫星导航定位系统^[1],它为全球用户提供全天候、连续、实时的高精度位置、速度和时间信息,目前越来越多地用于车辆动态参数的测试。车辆速度是汽车道路试验中的重要参数,对汽车整车动态性能的分析、制动系统的性能匹配和 ABS 的开发有着重要的意义和应用价值。

本设计采用 GPS (Superstar II) 与加速度计 (MMA7260Q)相结合的方式测量车速^[2,3],以高精度的 GPS 信息作为外部量测输入,在运动过程中频繁修正由加速度计信号积分得到的瞬时速度,以控制其误差随时间的积累。同时,短时间内高精度的加速度计信号积分结果,可以很好地解决 GPS 动态环境中的信号失锁和周跳问题,实现速度信号的高精度实时采集。

而组合测速系统中的关键问题是数据融合算法。文中提出用 Kalman 滤波实现加速度计与 GPS 数据的全组合方式的数据融合算法,直接读取 GPS 与加速度计的原始观测值作为 Kalman 滤波的量测输入信息,因此无量测输入相关问题,组合紧凑,所以运算速度快、速度快,更适用于实时应用^[4]。

1 车载 GPS/加速度计组合测速系统的组成

车载 GPS/加速度计组合测速系统的组成如图 1 所示^[5]。GPS 接收机捕获、跟踪卫星,接收、放大、解调 GPS 信号,还原出 GPS 卫星发送的导航电文,获得定位、测速、定时等数据。微处理器(C8051F040)定时完成对 GPS 和加速度计的数据采集^[6],并将二者数据包编号,通过串口向上位机传送。

2 自适应组合 Kalman 滤波数据融合算法

图 2 为车载 GPS/加速度计组合测速系统数据融合结构框图^[7]。Kalman 全局滤波器对 GPS 观测数据序列进行融合与滤波,并以 GPS 接收机输出的东向和

收稿日期:2008-05-28

基金项目:江苏省科学研究计划资助项目(06c04)

作者简介:陶玉贵(1979-),男,安徽南陵人,硕士,芜湖信息技术职业学院讲师,研究方向为汽车测控技术、自动检测与信号处理。

北向速度、加速度计当前输出的东向和北向加速度作为外部观测值。Kalman 局部滤波器对每 200ms 间隔中的加速度计插值数据序列进行融合与滤波,并且在加速度计数据插值点上,使用加速度计输出的车体坐标系中沿汽车行驶方向轴上的加速度绝对值,作为加速度计数据插值点 Kalman 方程的唯一外部观测量。

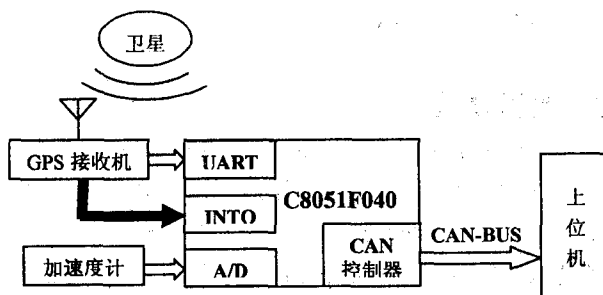


图1 车载 GPS/加速度计组合测速系统的组成

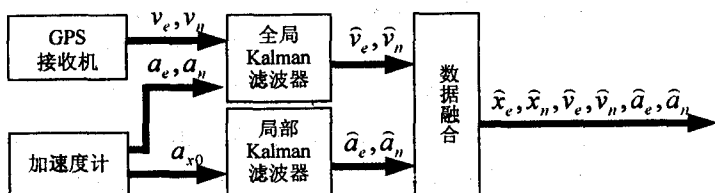


图2 组合测速系统数据融合结构框图

2.1 系统状态方程的建立

对于在二维平面运动的车载测速系统,组合 Kalman 滤波的整体状态变量可取为 $X = [x_e \ v_e \ a_e \ x_n \ v_n \ a_n]^T$, 其中 x_e, x_n 分别为车体东向和北向的位移分量, v_e, v_n 分别为车体东向和北向的速度分量, a_e, a_n 分别为车体东向和北向的加速度分量。采用机动载体的“当前”统计模型来描述车辆加速度的统计分布^[8], 即

$$a_e = \bar{a}_e + a_{e1}, a_{e1} = -\tau_e a_{e1} + w_e$$

$$a_n = \bar{a}_n + a_{n1}, a_{n1} = -\tau_n a_{n1} + w_n$$

其中, a_{e1}, a_{n1} 为零均值有色加速度噪声; \bar{a}_e, \bar{a}_n 为机动加速度均值, 它在每一采样周期内为常数; τ_e, τ_n 为对应马尔可夫过程的相关时间常数; w_e, w_n 是均值为零、方差分别为 $2\tau_e\sigma_e^2, 2\tau_n\sigma_n^2$ 的高斯白噪声。得到系统的连续状态方程为:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U + W(t) \quad (1)$$

$$\text{式中, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tau_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\tau_n \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_e \bar{a}_e \\ 0 \\ 0 \\ \tau_n \bar{a}_n \end{bmatrix}, \quad W(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_e \\ 0 \\ 0 \\ w_n \end{bmatrix}$$

将系统连续状态方程离散化, 得到系统离散状态方程:

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + U(k) + W(k) \quad (2)$$

式中, $X(k) = [x_e(k) \ v_e(k) \ a_e(k) \ x_n(k) \ v_n(k) \ a_n(k)]^T$ 。

2.2 系统观测方程的建立

2.2.1 GPS 数据观测点

对于周期为 200ms 的 GPS 信号更新点序列, 将 GPS 接收机输出的东向速度信息 v_e 、北向速度 v_n 以及加速度计输出的东向加速度 a_e 、北向加速度 a_n 作为外部观测向量。则观测向量 $Z_k = [z_1(k) \ z_2(k) \ z_3(k) \ z_4(k)]^T$, 并且外部观测向量与状态向量有如下的关系:

$$z_1(k) = v_e(k) + v_1(k)$$

$$z_2(k) = v_n(k) + v_2(k)$$

$$z_3(k) = a_e(k) + v_3(k)$$

$$z_4(k) = v_n(k) + v_4(k)$$

$v_i(k) (i = 1, 2, 3, 4)$ 为均值等于零、方差为 σ_{vi}^2 的高斯白噪声, 离散后的线性系统观测方程为:

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (3)$$

其中, $Z(k) = [v_e(k) \ v_n(k) \ a_e(k) \ a_n(k)]^T$, 观测矩

$$\text{阵 } H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad V(k) \text{ 的均值为零, 方}$$

差 $R(k) = \text{diag}\{\sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2, \sigma_{v3}^2, \sigma_{v4}^2\}$, 为常数矩阵。

2.2.2 加速度计数据差值点

在两次 GPS 信号间隔的 200ms 中, 利用周期为 5ms 的加速度计信号进行差值计算, 因此, 将加速度计信号沿汽车行进方向的加速度绝对值分量 a_{x0} 作为外部观测向量。则:

$$Z(k) = a_{x0}(k) = \sqrt{a_e(k)^2 + a_n(k)^2} + v(k)$$

$v(k)$ 为均值等于零、方差为 σ_v^2 的高斯白噪声。于是, 离散化的系统观测方程为: $Z(k) = h[X(k)] + V(k)$ 其中, $h[X(k)] = \sqrt{a_e(k)^2 + a_n(k)^2}$; $V(k)$ 的均值为零, 方差为 $R(k) = \sigma_v^2$ 。

由于观测方程是非线性方程, 为将其线性化, 采用扩展 Kalman 滤波技术(EKF) 即在一步预测值处将其展成泰勒级数, 并忽略高次项, 得

$$Z(k) = h[\hat{X}(k, k-1) + H(k)][X(k) - \hat{X}(k, k-1)] + V(k) = H(k)X(k) + V(k) + h[\hat{X}(k, k-1)] - H(k)\hat{X}(k, k-1) \quad (4)$$

其中,

$$H(k) = \frac{\partial h[X(k)]}{\partial X(k)} \Big|_{X(k)=\hat{X}(k,k-1)} = [0 \ 0 \ h_1 \ 0 \ 0 \ h_2],$$

$$h_1 = \frac{\hat{a}_e(k, k-1)}{\sqrt{\hat{a}_e^2(k, k-1) + \hat{a}_n^2(k, k-1)}},$$

$$h_2 = \frac{\hat{a}_n(k, k-1)}{\sqrt{\hat{a}_e^2(k, k-1) + \hat{a}_n^2(k, k-1)}}$$

2.3 更新算法

由于 GPS 数据观测序列所建立方程为标准的线性离散 Kalman 滤波器, 因此, 利用随机线性离散系统的 Kalman 滤波基本方程即可进行数据更新滤波, 方程如下

$$\hat{X}(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1) + U(k-1) \quad (5)$$

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k, k-1) + K(k)[Z(k) - H(k)[\hat{X}(k, k-1)]] \quad (6)$$

$$K(k) = P(k, k-1)H(k)^T[H(k)P(k, k-1)H(k)^T + R(k)]^{-1} \quad (7)$$

$$P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (8)$$

$$P(k) = [I - K(k)]P(k, k-1) \quad (9)$$

由于加速度计数据插值点所建立方程为非线性离散 Kalman 滤波器, 因此, 利用随机非线性离散系统扩展 Kalman 滤波基本方程进行数据的更新滤波, 方程如下

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k, k-1) + K(k)[Z(k) - h[\hat{X}(k, k-1) + H(k)]] \quad (10)$$

$$\hat{X}(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1) + U(k-1) \quad (11)$$

$$K(k) = P(k, k-1)H^T(k)[H(k)P(k, k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (12)$$

$$P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (13)$$

$$P(k) = [I - K(k)H(k)]P(k, k-1) \quad (14)$$

若把加速度的步预测看作“当前”加速度的均值, 即

$$\bar{a}_{e(k)} = \hat{a}_e(k, k-1), \bar{a}_{n(k)} = \hat{a}_n(k, k-1)$$

则式(11)可简化为

$$\hat{X}(k, k-1) = \Phi_1(k, k-1)\hat{X}(k-1) \quad (15)$$

$$\Phi_1(k, k-1) = \text{diag}\{\Phi_{1e}(k, k-1), \Phi_{1n}(k, k-1)\}, \Phi_{1e}(k, k-1) = \Phi_{1n}(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在以上的更新算法中, GPS 观测数据序列的更新周期 $T = T_G = 0.2s$, 而加速度计插值序列的更新周期 $T = T_A = 0.005s$ 。设置 \hat{X}_0 及 P_0 , 并用如上公式进

行 Kalman 更新滤波便可即时推算优化后每一采样时刻车辆的东向速度 $\hat{v}_e(k)$ 、北向速度 $\hat{v}_n(k)$ 信息。而车辆在行驶方向上的速度信息可用下式进行转换:

$$\hat{x}(k) = \sqrt{\hat{x}_e^2(k) + \hat{x}_n^2(k)}$$

$$\hat{v}(k) = \sqrt{\hat{v}_e^2(k) + \hat{v}_n^2(k)}$$

$$\hat{a}(k) = \sqrt{\hat{a}_e^2(k) + \hat{a}_n^2(k)}$$

3 测试试验

为验证数据融合算法的可行性和有效性, 进行了一次从时速大于 50km/h 开始的低附着系数路面制动试验。首先, 对加速度计信号进行减谱去噪^[9], 并用小波滤波去除信号中的随机白噪声, 将得到的加速度计输出信号和 GPS 信号按上述算法进行数据融合。计算时初始条件选取为: $\tau_e = \tau_n = 1, \sigma_e = \sigma_n = 10$, $\hat{X}(0) = [0 \ z_1(0) \ 0 \ z_2(0) \ 0]$, GPS 观测序列 $R_1 = \text{diag}\{1^2, 1^2, 0.1^2, 0.1^2\}$, 加速度插值数据观测序列 $R_2 = 0.1^2$, $P(0) = \text{diag}\{0^2, 1^2, 0.2^2, 0^2, 1^2, 0.2^2\}$, 得到车辆在行进过程中以 5ms 为周期东向速度和北向速度, 并能进一步计算出车辆的相对地速度。

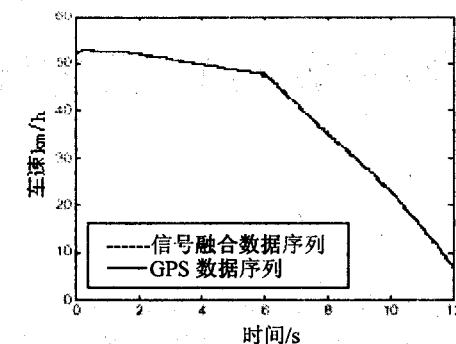
图 3 为使用滤波和未滤波的加速度计信号进行本系统所设计的数据融合后所得的车辆对地速度与 GPS 对地速度观测序列的对比曲线, 并且将两图中误差最大处放大如图 4 所示。通过对比后发现, 未滤波加速度计信号融合车速在 200ms 内的累积误差达到 1.25km/h, 而本次试验最高车速为 52.65km/h, 因此, 精度仅为 2.37%, 远远不能满足 1% 的参数精度要求。但是利用了文中所述滤波方法对加速度计输出信号进行滤波处理, 然后再进行数据融合之后, 使得 200ms 内的累积误差缩小到 $<0.5\text{km/h}$, 将系统测量精度提高到 $<0.94\%$, 满足了参数的精度要求。因此, 使用滤波加速度计信号进行数据融合后计算得到的参数能够对 GPS 观测序列进行有效的插值补偿。

4 结束语

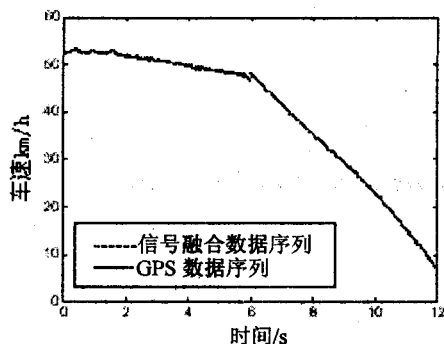
提出了一种自适应联合 Kalman 滤波方法及其算法。运用随机线性离散系统 Kalman 滤波和非线性离散系统扩展 Kalman 滤波等技术而获得的车辆动态参数, 噪声小, 可靠性高, 达到了试验所要求的精度, 充分验证了本算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 刘基余. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [2] SUPERSTARII Firmware Reference Manual[EB/OL]. 2004



(a) 滤波加速度计信号



(b) 未滤波加速度计信号

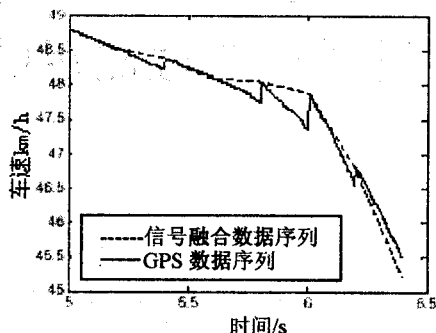
图3 滤波前后车辆对地速度曲线比较

- 11. <http://www.novatel.com/Documents/Manuals/om-20000086.pdf>.

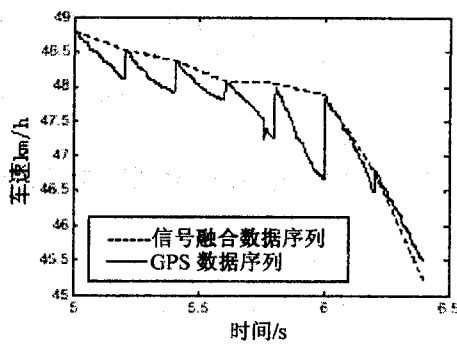
- [3] Sensor Products MMA7260Q XYZ Three-Axis Low g Acceleration Sensor [EB/OL]. 2005 - 06. <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/fact-sheet/MMA7260QFS.pdf>.

- [4] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

- [5] 陆晶晶, 张为公, 周耀群. 基于 GPS 和加速度计的车速测



(b) 滤波加速度计信号



(c) 未滤波加速度计信号

图4 滤波前后车辆对地速度局部放大曲线比较

量系统的开发与研制[J]. 测控技术, 2007, 26(8): 15 - 18.

- [6] Cygnal Integrated Products, Inc. C8051F 单片机应用解析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

- [7] 付梦印, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

- [8] Zhou H R, Kumar K S P. A current statistical model and adaptive algorithm for estimating maneuvering targets [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1984, 7(5): 596 - 602.

- [9] 赵力. 语音信号处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(上接第 199 页)

3 结束语

从本体论的角度出发探讨了果品领域本体的建立过程。随着对果品领域本体的进一步研究, 许多问题和目标也将呈现出来, 总的来说主要有以下几点:

(1) 目前农业本体库主要是由手工开发。半自动获取虽然取得了一些进步, 但仍然有很大的局限。自动获取, 包括基于本体的自动获取还处于起步阶段。

(2) 需要建立一套完整的本体评估标准, 主要是保证知识的清晰性、一致性、完整性、可扩展性, 使知识得到有效的共享和重用。

(3) 果品领域本体通过对类和类之间关系的严格定义来确定类的精确含义, 表示果品领域中共同认可的、可共享的知识。

在语义网中, 是解决语义层次上 Web 信息共享和交换的基础, 具有非常重要地位。因此, 如何在果品本

体基础上开发 Web 本体是果品语义网研究的任务。

参考文献:

- [1] Studer, Benjamins V R, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods [M] // Data and Knowledge Engineering. [s.l.]: [s.n.], 1998: 161 - 197.
- [2] Gruber T R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing [J]. International Journal of Human and Computer Studies, 1995, 43: 907 - 928.
- [3] Noy N F, McGuinness D L. Ontology development: a guide to increasing your first ontology [R]. USA: Stanford University, 2001.
- [4] Musen M, Noy N, O'Connor M, et al. Stanford Center for Biomedical Informatics Research [EB/OL]. 2008. <http://protege.stanford.edu/>.
- [5] 冯志勇, 李文杰, 李晓红, 等. 本体论工程及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 88 - 89.