

文章编号:1005-0523(2015)03-0012-04

基于粒子滤波算法信息融合的磁悬浮列车定位研究

熊春红, 李晓龙, 韩静茹

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要:为提高磁悬浮列车的行车安全和效率,采用多传感器信息融合技术对中低速磁悬浮列车进行测速定位,以交叉感应回线测速定位和雷达传感器对进行相对定位,以查询应答器来实现绝对定位。利用粒子滤波算法对中低速磁悬浮列车测速定位的精度和可靠性进行分析,并用MATLAB仿真进行验证,证明该融合结构和融合算法能够提高列车的定位精度。

关键词:信息融合;测速定位;粒子滤波;查询应答器

中图分类号:U237

文献标志码:A

为了磁悬浮列车的安全运营,必须得对列车进行精确定位,国内外磁悬浮列车测速定位技术有:多普勒雷达测速定位,微波测速定位,基于轨间电缆测速定位,交叉感应回线测速定位,“集距检测+信标”等测速定位^[1-2]。对于中低速磁悬浮常采用交叉感应回线^[3]进行定位,电磁干扰、回线和天线的安装误差、列车振动等都会影响交叉感应回线测速定位的精度^[4],且随着运行距离增加存在误差累积现象,避免单一传感器信息误差问题,国内外学者采用多传感器信息融合技术,欧洲宇航局应用融合算法,对接收到的GNSS数据,里程计/加速度计数据,陀螺数据,进行数据的融合。英国谢菲尔德大学的学者构建了基于GPS、多普勒雷达、陀螺仪、转速计、数字地图和应答器等传感器的导航系统,利用Kalman滤波进行了传感器数据的融合。张辉的基于“当前”卡尔曼滤波算法的卫星导航/基于转速传感器定位研究^[5],陆德彪从信息可信性角度研究卫星导航/惯性测量装置列车组合定位^[6]。本文采用多传感器信息融合技术,用交叉感应回线和雷达传感器对列车进行相对定位,以查询应答器来实现绝对定位,来消除累积误差,进行精确定位。

1 粒子滤波理论

多传感器信息领域中的线性和非线性状态估计理论有很多,对于一般的非线性系统,常采用EKF(扩展卡尔曼滤波),但在很多情况下,动态系统具有强非线性,EKF的估计性能可能因一阶线性近似之后导致很大的模型误差而迅速下降甚至产生滤波发散。粒子滤波(particle filter,简称PF)是通过随机样本的状态和权值来计算后验概率分布,是一种简单、有效的由非高斯、非线性的观测数据计算后验概率的方法^[7]。由于它具有精度高,收敛速度快等特点,跟踪性能要远优于EKF的性能^[8-9],而被广泛应用。由于标准的粒子滤波存在粒子样本贫化^[10]等缺点,为了解决这一缺陷,可以选取好的重要性密度函数和粒子重采样^[11-12]。假设给定以下非线性系统模型

$$\begin{cases} x_k = f_k(x_{k-1}, v_{k-1}) \\ z_k = h_k(x_k, w_k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_k 表示 k 时刻状态方程; z_k 表示 k 时刻的测量方程; v_k , w_k 分别是一个相互独立的同分布高斯噪声

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAG19B01)

作者简介: 熊春红(1991—),女,硕士研究生,研究方向为磁浮车辆检测技术。

通讯作者: 李晓龙(1964—),男,副研究员,博士,主要研究方向为轨道列车牵引供电与节能。

序列; $f_k(\cdot)$ 和 $h_k(\cdot)$ 分别为过程和测量非线性函数。

2 列车运行系统的数学模型和测量方程

2.1 列车的运动模型

列车运行过程中包括CA(匀加速)、CV(匀速)以及从CV到CA等状态。Singer模型^[13]是假设载体的机动加速度 $a(t)$ 服从零均值、平稳的一阶时间相关过程,能描述从CV到CA之间的不同状态,但是基于列车大部分时间都是处于CV或CA状态,加上Singer模型比较复杂,因为匀速是加速度为零的特殊情况,所以本文将只对CA模型进行研究。

列车CA运动模型

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} W(t) \quad (2)$$

式中: $X(t)=[x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$; $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 分别表示 t 时刻列车的位置,速度和加速度; $W(t)$ 表示高斯白噪声,均值为0,方差为 σ^2 。将式(2)离散化后得到列车状态方程

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix} W(k) \quad (3)$$

式中: $X(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix}$; $W(k)$ 为离散空间的高斯白噪声; T 为离散采样周期。

2.2 相对定位传感器测量方程

根据交叉感应回线的测速定位原理及误差分析,可以得到交叉感应回线的测量方程

$$Z_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + N_1(t) \quad (4)$$

式中: $Z_1(t)$ 为 t 时刻测量到的位置; $N_1(k)$ 是均值为0的测量噪声。将式(4)离散化,得到离散测量方程为

$$Z_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + N_1(k) \quad (5)$$

同理,根据对雷达测速传感器的原理与定位误差分析,多普勒雷达速度传感器的测量方程为

$$Z_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + N_2(t) \quad (6)$$

式中: $Z_2(t)$ 为 t 时刻测量到的速度; $N_2(k)$ 是均值为0的测量噪声。将式(6)离散化,得到离散测量方程为

$$Z_2(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + N_2(k) \quad (7)$$

3 建立粒子滤波列车测速定位信息融合系统

根据联邦滤波的理论,建立列车的测速定位信息融合系统,如图1所示,在该系统中,局部滤波器是粒子滤波器,交叉感应回线和雷达测速传感器分别经过粒子局部滤波器对列车运行状态进行估计,主滤波器除了进行时间更新和子滤波器输入的信息进行融合外,同时对查询应答器输入的信息进行位置更新。这样得到主融合器的输出,就是全局的状态最优估计 \hat{X}_g 。将 \hat{X}_g 反馈到局部滤波器中,作为下一次进行滤波的基础。

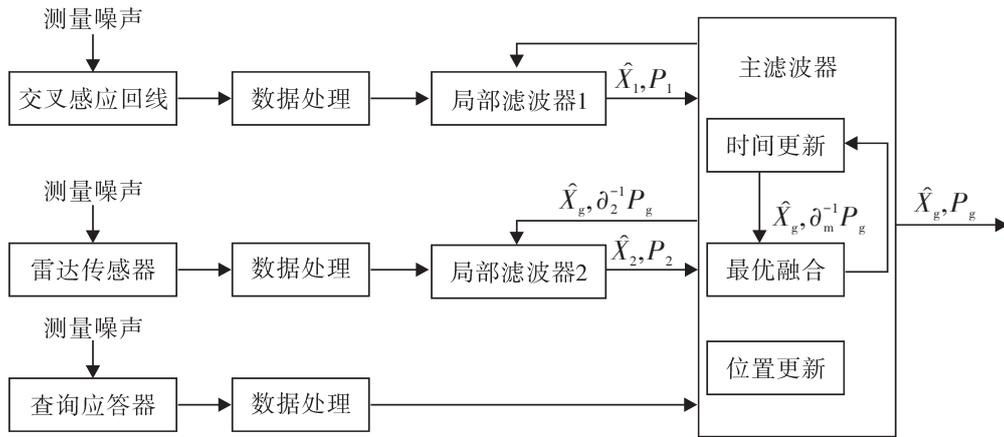


图1 联邦粒子滤波测速定位系统结构图

Fig. 1 Structural chart of federal particle filter speed and position detection system

第 i 个 ($i=1,2$) 局部滤波器估计值 \hat{X}_i , 方差 P_i , 信息分配系数为 ∂_i , 满足守恒定理 $\partial_1 + \partial_2 = 1$ 。 ∂_1 是交叉感应回线信息分配系数, ∂_2 是雷达传感器信息分配系数, 因为在中低速情况下, 交叉感应回线测量精度比雷达传感器高, 所以, 当列车速度小于 $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候, $\partial_1 = 0.8$, 大于 $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时候 $\partial_1 = 0.5$ 。 将局部滤波器状态估计融合成全局最优估计, 主融合器的算法为

$$\begin{cases} P_g(k) = [P_1^{-1}(k) + P_2^{-1}(k)]^{-1} \\ \hat{X}_g(k) = P_g [P_1^{-1} \hat{X}_1(k) + P_2^{-1} \hat{X}_2(k)] \\ \hat{X}_i(k) = \hat{X}_g(k) (i = 1, 2) \end{cases} \quad (8)$$

4 仿真验证

采用 MATLAB 进行仿真, 假设列车以 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度、 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的加速度匀加速前进过程中, 通过粒子滤波后所测得到的速度和位置, 系统过程噪声方差为 0.001, 交叉感应回线量测噪声量测方差为 0.01, 雷达测速传感器量测方差为 0.01, 仿真采样周期为 1, 仿真结果如图 2 所示。

通常情况下, 要获得更好的定位精度效果, 交叉感应回线适合用于低速情况下, 雷达测速传感器适合高速情况下。 但是由于状态估计精度会受到传感器的影响, 如使用单一传感器进行全程的测速定位时, 其位置、 速度估计精度很难得到满足。 通过实验仿真, 图 2、 图 3 分别是对交叉感应回线和雷达传感器测速定位信息融合后, 采用粒子滤波算法后的速度与位置仿真图像, 经过 100 s 后, 列车速度达到 $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 而位移将近 7 km。 从图 4 可以看出, 列车行驶 20 s 后, 位置误差增大很明显, 在速度达到 $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 过程中, 位置

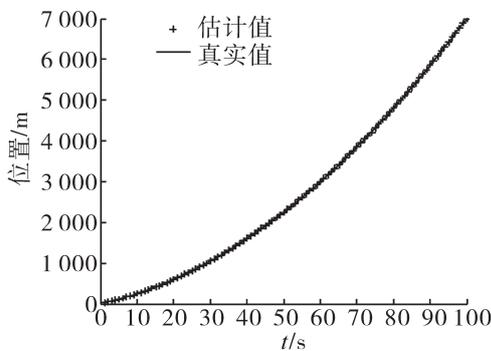


图2 基于粒子滤波信息融合后的估计位置与真实位置
Fig.2 Estimated and real position after information fusion based on particle filter

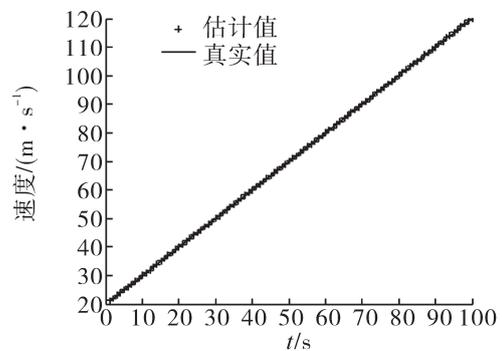


图3 基于粒子滤波信息融合后的估计速度与真实速度
Fig.3 Estimated and real speed after information fusion based on particle filter

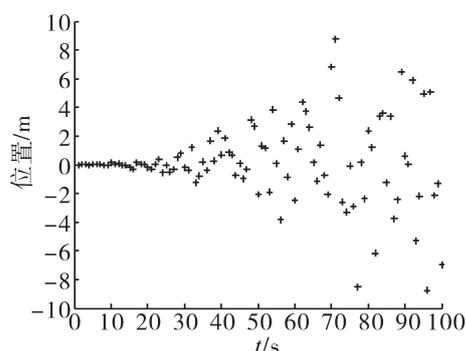


图4 基于粒子滤波信息融合后的位置误差
Fig.4 Position error after information fusion based on particle filter

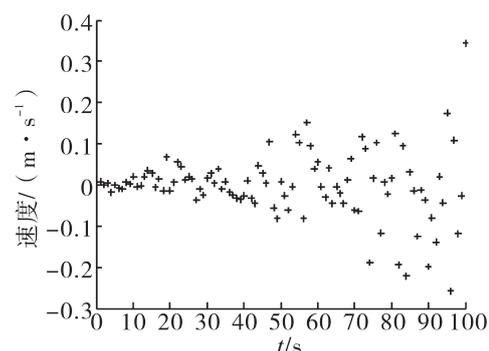


图5 基于粒子滤波信息融合后的速度误差
Fig.5 Speed error after information fusion based on particle filter

误差范围在 $-10 \sim 10$ m之间,因为速度的误差存在,加上位置累积误差,而且运行时间越长,误差越大,所以图4中的粒子成发散趋势。从图5,可以看出,速度的误差在 $-0.3 \sim 0.4$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,随着运行时间增加,加上噪声等因素影响,速度误差也会随之增大。

图6在交叉感应回线和雷达测速的基础上,再采用查询应答器进行位置更新后的位置误差,三者进行信息融合,假设每隔1 km,设置一个查询应答器,刚好到达查询应答器上方时,列车位置信息被更新。在列车未行驶至1 km的查询应答器时,位置误差与以前差不多,之后每隔1 km位置便会被更新一次,位置误差范围在1 m内,误差相比图4,精确度提高很多。

5 结论

基于粒子滤波算法,建立了列车测速定位信息融合系统,先对交叉感应回线测速定位和雷达传感器测速进行信息融合处理,分析融合后位置和速度的定位误差,并采用MATLAB对该系统进行仿真,再对比增加查询应答器,三者进行信息融合后的位置误差效果,仿真结果表明增加查询应答器后对列车进行定位,定位精度明显提高。

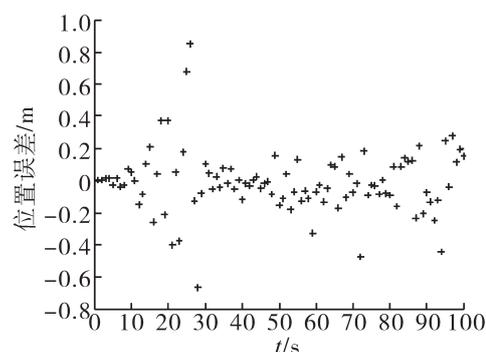


图6 增加查询应答器粒子滤波信息融合后的位置误差
Fig.6 Position error after information fusion with the balise based on particle filter

参考文献:

- [1] 钱存元,韩正之,邵德荣,等.磁悬浮列车测速定位技术[J].上海交通大学学报,2004,38(11):1902-1906.
- [2] 戴春辉,薛松,龙志强.基于长定子齿槽的磁悬浮列车测速定位传感器信号处理[J].传感技术学报,2009(6):822-826.
- [3] 龙志强,李晓龙,周文武,等.磁悬浮列车的定位和测速技术研究[J].国防科技大学学报,2003,25(4):82-88.
- [4] 李晓龙,刘锡良,史黎明.磁悬浮列车测速定位中的信息融合研究[J].电子科技大学学报,2013,42(1):1-5.
- [5] 张辉.基于GNSS/ODO的列车定位方法研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [6] 陆德彪.列车组合定位系统可信性研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [7] 曲巨宝.利用自适应组合模型实现车辆跟踪[J].华东交通大学学报,2010,27(4):39-43.
- [8] 胡士强,敬忠良.粒子滤波算法综述[J].控制与决策,2005(4):361-365.
- [9] 冯驰,吕晓凤,汲清波,等.粒子滤波理论及其在目标跟踪中的应用[J].计算机工程与应用,2008,44(6):246-248.
- [10] 张才千,葛磊,韩东.基于目标跟踪的粒子群粒子滤波算法研究[J].计算机仿真,2014(8):392-396.

(下转第113页)

Synthesis of Tributyl Citrate Catalyzed by Rare Earth Solid Superacid $S_2O_8^{2-}/ZrO_2-La_2O_3$

Liu Jianping, Wu Lili, Zhang Junjun, Xu Peifei

(Department of Chemistry and Chemical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Tributyl citrate(TBC) was synthesized by reaction of citric acid with n-butanol using rare earth solid superacid $S_2O_8^{2-}/ZrO_2-La_2O_3$ as the catalyst. Effects of La content on the catalyst structures were determined by using XRD and FT-IR. Effects of catalyst dosage, molar ratio of n-butanol to citric acid, reaction time on the esterification rates were explored by orthogonal experiment. Results show that the catalyst can present the best behavior under concentration of the La content of $0.07 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The optimum synthesis condition of TBC adds 4 times of n-butanol to citric acid, under the condition of temperature $175 \text{ }^\circ\text{C}$ for 180 min using 2.0 wt% catalyst, with the yield of ester reaching 98.27%. The catalyst can be reused for 5 times without significant decline in its behavior. The structure of the product was qualitatively analyzed by refractive index, FT-IR, $^1\text{H-NMR}$, and $^{13}\text{C-NMR}$.

Key words: tributyl citrate; rare earth solid superacid; $S_2O_8^{2-}/ZrO_2-La_2O_3$; esterification rate

(责任编辑 刘棉玲)



(上接第15页)

[11] 邹国辉,敬忠良,胡洪涛.基于优化组合重采样的粒子滤波算法[J].上海交通大学学报,2006,40(7):1135-1139.

[12] 王龙,夏厚培.改进粒子滤波算法及其在目标跟踪中的应用[J].信息技术,2013(2):121-123.

[13] 孔博,修建娟,修建华.基于 Singer 模型的机动目标无源定位跟踪方法研究[J].电光与控制,2011(5):14-18.

Maglev Train Position Detection Based on Information Fusion of Particle Filter Algorithm

Xiong Chunhong, Li Xiaolong, Han Jingru

(Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to improve the operation safety and efficiency of the maglev train, multi-sensor information fusion technology is adopted in low-speed maglev trains speed positioning. The relative positioning is realized by the radar and cross induction coil, and the absolute positioning is conducted by the balise. Particle filter algorithm is used to analyze the low-speed maglev train speed positioning accuracy and reliability, and MATLAB simulation is then adopted to verify the results. It maintains that the fusion structure and fusion algorithm effectively improve the positioning accuracy of the train by exploring the error effect caused by random noise.

Key words: information fusion; speed and position detection; particle filter; balise

(责任编辑 姜红贵)