

控制与决策

Control and Decision

基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法

林爽, 张依恋, 丁宗贺, 牛王强

引用本文:

林爽, 张依恋, 丁宗贺, 牛王强. 基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 129–136.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

[含有分数阶有色关联噪声的分数阶系统的卡尔曼滤波器设计](#)

Design of Kalman filter for fractional-order systems with correlated fractional-order colored noises

控制与决策. 2021, 36(7): 1672–1678 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1418>

[一种反向递推正弦干扰观测器的设计方法](#)

Design method of reverse recursive sinusoidal disturbance observer

控制与决策. 2021, 36(2): 403–410 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>

[基于稀疏度阶数优化的杂波密度估计算法](#)

A clutter density estimation algorithm by optimized sparsity order

控制与决策. 2020, 35(12): 2923–2930 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0429>

[参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制](#)

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters

控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法

林爽, 张依恋[†], 丁宗贺, 牛王强

(上海海事大学 航运技术与控制工程交通行业重点实验室, 上海 201306)

摘要: 针对自动跨运车状态估计问题, 设计改进的集员滤波算法, 在未知有界噪声环境下, 获取自动跨运车实时运动状态估计信息. 首先, 将自动跨运车运动学模型进行线性化处理, 同时考虑其转向因素和侧倾因素, 得到车辆的动力学线性模型; 其次, 将可能存在的内外部扰动建模为未知有界噪声, 进而设计改进的集员滤波器, 通过获取状态椭球域实现对自动跨运车运动参数的状态估计, 同时给出改进的集员滤波算法; 最后, 通过仿真实验验证所提出算法的可行性和有效性. 实验结果表明, 所提出的改进集员滤波算法具有良好的状态估计性能.

关键词: 集员滤波器; 未知有界噪声; 自动跨运车; 状态估计; 线性离散时变系统; 车辆动力学

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0501

引用格式: 林爽, 张依恋, 丁宗贺, 等. 基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 129-136.

State estimation of automated straddle carriers via improved set-membership filtering approach

LIN Shuang, ZHANG Yi-lian[†], DING Zong-he, NIU Wang-qiang

(Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering Ministry of Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper is concerned with the state estimation problem for an automated straddle carrier. An improved set-membership filtering scheme is proposed to solve the state estimation problem of the automated straddle carrier under unknown-but-bounded (UBB) process and measurement noises. First, the kinematic model of the automated straddle carrier is linearized to obtain the vehicle linear dynamic model. Then, an improved filtering method is designed to realize the state estimation of vehicle motion parameters by obtaining the state estimation ellipsoids. Finally, the simulations verify the feasibility and effectiveness of the proposed method. The experimental results show that the proposed algorithm has good state estimation performance.

Keywords: set-membership filter; unknown-but-bounded noise; automated straddle carrier; state estimation; LDTV system; vehicle dynamics

0 引言

随着智慧港口概念的普及和港口自动化技术的发展, 自动化集装箱码头建设不断推进. 自动跨运车是自动化集装箱码头的一类新型运输设备, 准确获取其行驶速度及运动姿态等信息是实现安全可靠运行的关键环节^[1-2]. 然而, 在实际应用中码头工作环境复杂多变, 自动跨运车在行驶过程中以及传感器检测过程中均易受到环境因素的干扰, 例如风力、温度等. 这些因素会对自动跨运车状态信息获取的精确性产生影响, 并可能进一步导致控制效果失效, 产生翻车、码

头拥堵等一系列严重后果. 因此, 针对干扰环境下的自动跨运车状态估计问题进行深入研究具有重要意义^[3-7].

目前, 卡尔曼滤波是车辆状态估计方法中应用最为广泛的技术之一^[8-11]. 在理想情况下, 卡尔曼滤波方法可以通过迭代运算获取车辆状态的最优估计. 然而, 卡尔曼滤波对噪声的概率分布有着较高要求, 实际系统往往无法明确其噪声的精确分布或保证其为高斯白噪声, 导致卡尔曼滤波性能有所降低. H_∞ 滤波方法在状态估计和路径跟踪问题上也有

收稿日期: 2022-03-29; 录用日期: 2022-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62176150); 上海市地方院校能力建设项目(20040501400).

责任编委: 虞文武.

[†]通讯作者. E-mail: zhangyl@shmtu.edu.cn.

$$\beta_{li} = \beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{li},$$

$$\beta_{ri} = \beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{ri}.$$

则自动跨运车车轮侧偏力为

$$F_{li} = -K_{li} \left(\beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{li} \right),$$

$$F_{ri} = -K_{ri} \left(\beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{ri} \right).$$

其中: 当 $i = 1, 2$ 时式中 \pm 为 $+$, 当 $i = 3, 4$ 时式中 \pm 为 $-$; δ 为自动跨运车车轮转角; δ_{li} 、 δ_{ri} 分别为自动跨运车第 i 行左、右侧车轮转角; K_{li} 、 K_{ri} 分别为自动跨运车第 i 行左、右侧车轮侧偏刚度。

根据平行轴定理可知, $I_{xeq} = I_x + mh^2$. 由于自动跨运车侧倾角度小, 令 $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi = 1$, 惯性积 $I_{xz} = \int x dz \int z dz = 0$. 自动跨运车的动力学模型可以表示为

$$mv(\dot{\beta} + \gamma) - mh\ddot{\varphi} + \sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri})\beta + \frac{\sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri})}{v} \gamma -$$

$A =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri}) I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{\sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri}) I_{xeq}}{mv^2 I_x} & -1 & \frac{h(mgh - K_\phi)}{I_x v} & -\frac{hC\phi}{I_x v} \\ \frac{\sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri})}{I_z} & \frac{\sum_{i=1}^4 L_i^2(K_{li} + K_{ri})}{I_z v} & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri}) h}{I_x} & \frac{\sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri}) h}{I_x v} & & \frac{mgh - K_\phi}{I_x} & -\frac{C_\phi}{I_x} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{l1} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l2} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l3} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l4} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r1} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r2} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r3} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r4} I_{xeq}}{mv I_x} \\ \frac{L_1 K_{l1}}{I_z} & \frac{L_2 K_{l2}}{I_z} & \frac{L_3 K_{l3}}{I_z} & \frac{L_4 K_{l4}}{I_z} & \frac{L_1 K_{r1}}{I_z} & \frac{L_2 K_{r2}}{I_z} & \frac{L_3 K_{r3}}{I_z} & \frac{L_4 K_{r4}}{I_z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{h K_{l1}}{I_x} & \frac{h K_{l2}}{I_x} & \frac{h K_{l3}}{I_x} & \frac{h K_{l4}}{I_x} & \frac{h K_{r1}}{I_x} & \frac{h K_{r2}}{I_x} & \frac{h K_{r3}}{I_x} & \frac{h K_{r4}}{I_x} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2 状态估计问题描述

考虑如图2所示的自动跨运车跟踪控制策略. 自动跨运车在实际工作环境下往往受到风力、温度等环境因素的影响, 例如在侧向风作用下, 自动跨运车侧向力、侧倾力矩会增大, 运行的稳定性会受到负面影响. 这些负面干扰往往是不确定的, 无法具体描

$$\sum_{i=1}^4 (K_{li} \delta_{li} + K_{ri} \delta_{ri}) = 0, \tag{4}$$

$$I_z \dot{\gamma} + \sum_{i=1}^2 L_i (K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i (K_{li} + K_{ri}) \beta + \frac{\sum_{i=1}^4 L_i^2 (K_{li} + K_{ri})}{v} \gamma - \sum_{i=1}^2 L_i (K_{li} \delta_{li} + K_{ri} \delta_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i (K_{li} \delta_{li} + K_{ri} \delta_{ri}) = 0, \tag{5}$$

$$I_{xeq} \ddot{\varphi} - mhv(\dot{\beta} + \gamma)h - mgh\varphi + C_\phi \dot{\varphi} + K_\phi \varphi = 0. \tag{6}$$

选取状态变量 $\dot{x} = [\beta \ \gamma \ \varphi \ \dot{\varphi}]^T$, 输出变量 y , 控制输入 $u_k = [\delta_{l1} \ \delta_{l2} \ \delta_{l3} \ \delta_{l4} \ \delta_{r1} \ \delta_{r2} \ \delta_{r3} \ \delta_{r4}]^T$, 可建立系统的状态方程及观测方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx. \end{cases} \tag{7}$$

其中 A 、 B 、 C 为

述为精确的概率分布. 然而, 在实际操作中可根据已有的统计数据获取其近似边界, 因此本文采用未知有界噪声 w_k 和 v_k 描述自动跨运车的噪声干扰. 其中 w_k 和 v_k 为过程噪声和测量噪声, 分别属于以下椭球集:

$$\mathcal{W}_k \triangleq \{w_k : w_k^T Q_k^{-1} w_k \leq 1\}, \tag{8}$$

$$\mathcal{V}_k \triangleq \{v_k : v_k^T R_k^{-1} v_k \leq 1\}, \tag{9}$$

其中 $Q_k = Q_k^T > 0, R_k = R_k^T > 0$ 是具有相容维数的已知矩阵。

将连续时间模型(7)按 T_s 离散,同时考虑系统存在噪声(8)和(9),可以得到如下离散系统的状态方程和观测方程:

$$x_{k+1} = A_p x_k + B_p u_k + w_k, \quad (10)$$

$$y_k = C_p x_k + v_k. \quad (11)$$

其中: $A_p = e^{AT_s}, B_p = \int_0^{T_s} e^{A\tau} d\tau, C_p = C$.

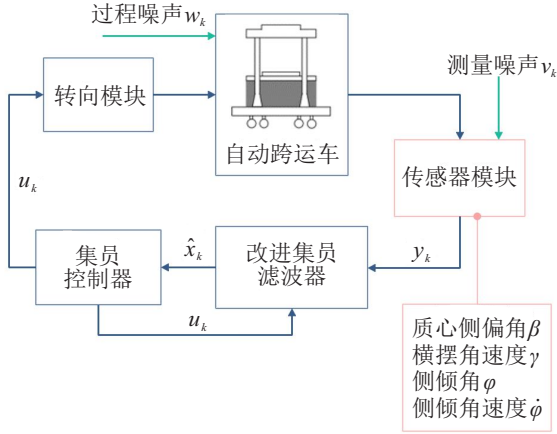


图2 自动跨运车跟踪控制系统

在实际应用中,自动跨运车工作时运载集装箱的个数为 $n(n = 0, 1, 2)$,其质量和质心高度随负载不同而变化,本文中 A_p 及 B_p 在负载给定的情况下为定常矩阵,当负载变化时, A_p, B_p 可通过变化参数 m, h 及转动惯量大小而变化,矩阵的计算公式不变,因此构建的自动跨运车模型可以有效应对不同负载的工作情况。

假设初始状态 x_0 属于如下给定椭球域:

$$\{x_0 : (x_0 - \hat{x}_0)^T P_0^{-1} (x_0 - \hat{x}_0) \leq 1\}. \quad (12)$$

其中: \hat{x}_0 为 x_0 的估计值并假定已给定, $P_k = P_k^T > 0$ 为已知矩阵。

针对受到未知有界的过程噪声和测量噪声干扰的自动跨运车系统(10)、(11),设计如下形式的集员滤波器:

$$\hat{x}_{k+1} = G_k \hat{x}_k + (I - L_k C_p) B_p u_k + L_k y_{k+1}. \quad (13)$$

其中: \hat{x}_k 为 x_k 的一个任意状态估计值, G_k 和 L_k 为待确定的滤波器参数.由于本文内容不涉及控制器设计,控制信号 u_k 设置为一组可变常数矩阵.与文献[17,20]所设计的集员滤波器相比,滤波器(13)可以有效消除控制作用的影响。

假设 k 时刻,真实状态 x_k 包含在椭球域 $\mathcal{X}_k \triangleq \{x_k : (x_k - \hat{x}_k)^T P_k^{-1} (x_k - \hat{x}_k) \leq 1\}$ 内,且 $P_k =$

$E_k E_k^T$. 本文的设计目标是设计滤波器(13),使得 $k+1$ 时刻自动跨运车的真实状态 x_{k+1} 包含在以下估计椭球内:

$$\mathcal{X}_{k+1} \triangleq \{x_{k+1} : (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1\}. \quad (14)$$

3 集员滤波器设计

针对存在未知有界噪声干扰的自动跨运车系统,设计满足目标(14)的改进集员滤波器(13).本节给出改进集员滤波器的推导过程,并设计改进集员滤波器的凸优化递归算法。

由式(10)和(13)可得,一步提前估计误差 $x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}$ 为

$$\begin{aligned} x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} &= A_p x_k + B_p u_k + w_k - G_k \hat{x}_k - \\ & (I - L_k C_p) B_p u_k - L_k y_{k+1} = \\ & A_p x_k + L_k C_p B_p u_k + w_k - \\ & G_k \hat{x}_k - L_k (C_p x_{k+1} - v_{k+1}) = \\ & (I - L_k C_p) A_p x_k - G_k \hat{x}_k + \\ & (I - L_k C_p) w_k - L_k v_{k+1}. \end{aligned} \quad (15)$$

在 k 时刻,由于 P_k 和 \hat{x}_k 已知,且 $(x_k - \hat{x}_k)^T P_k^{-1} (x_k - \hat{x}_k) \leq 1$,存在 $\|z\| \leq 1$ 满足

$$x_k = \hat{x}_k + E_k z. \quad (16)$$

因此有

$$\begin{aligned} x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} &= (A_p - A_p L_k C_p - G_k) \hat{x}_k + (A_p - \\ & A_p L_k C_p) E_k z + (I - L_k C_p) w_k - L_k v_{k+1}. \end{aligned} \quad (17)$$

若令

$$\eta_k = [1 \quad z \quad w_k \quad v_{k+1}]^T, \quad (18)$$

$$\Pi(\hat{x}_k) = \begin{bmatrix} [(A_p - A_p L_k C_p - G_k) \hat{x}_k]^T \\ [(A_p - A_p L_k C_p) E_k]^T \\ (I - L_k C_p)^T \\ (-L_k)^T \end{bmatrix}^T, \quad (19)$$

则可以得到

$$x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} = \Pi(\hat{x}_k) \eta_k. \quad (20)$$

因此 $(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1$ 可以写成

$$\eta_k^T [\Pi^T(\hat{x}_k) P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \text{diag}(1, 0, 0, 0)] \eta_k \leq 0. \quad (21)$$

通过前面分析, z 、 w_k 、 v_{k+1} 有如下约束条件:

$$\begin{cases} \|z\| \leq 1, \\ w_k^T Q_k^{-1} w_k \leq 1, \\ v_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} v_{k+1} \leq 1. \end{cases} \quad (22)$$

式(22)可以用 η_k 表示为

$$\begin{cases} \eta_k^T \text{diag}(-1, I, 0, 0) \eta_k \leq 0, \\ \eta_k^T \text{diag}(-1, 0, Q_k^{-1}, 0) \eta_k \leq 0, \\ \eta_k^T \text{diag}(-1, 0, 0, R_{k+1}^{-1}) \eta_k \leq 0. \end{cases} \quad (23)$$

根据 S-Procedure 可知, 使得不等式(20)成立的充分条件是存在正标量 τ_1 、 τ_2 和 τ_3 , 使得

$$\begin{aligned} & \Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \text{diag}(1, 0, 0, 0) - \\ & \tau_1 \text{diag}(-1, I, 0, 0) - \tau_2 \text{diag}(-1, 0, Q_k^{-1}, 0) - \\ & \tau_3 \text{diag}(-1, 0, 0, R_{k+1}^{-1}) \leq 0. \end{aligned} \quad (24)$$

进一步, 式(24)可以写成

$$\begin{aligned} & \Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \\ & \text{diag}(1 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3, \tau_1 I, \tau_2 Q_k^{-1}, \tau_3 R_{k+1}^{-1}) \leq 0. \end{aligned} \quad (25)$$

若令

$$\begin{aligned} & \Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \\ & \text{diag}(1 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3, \tau_1 I, \tau_2 Q_k^{-1}, \tau_3 R_{k+1}^{-1}), \end{aligned} \quad (26)$$

则式(25)可以表示为

$$\Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \leq 0. \quad (27)$$

式(27)等价于

$$\begin{bmatrix} -P_{k+1} & \Pi(\hat{x}_k) \\ \Pi^T(\hat{x}_k) & -\Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \end{bmatrix} \leq 0. \quad (28)$$

根据 Schur 补引理, 该优化问题可以利用半定规划 (semi-definite programming, SDP) 方法通过内点法求解. 因此, 若存在 $P_{k+1} > 1$, G_k , L_k , $\tau_1 > 0$, $\tau_2 > 0$, $\tau_3 > 0$ 使递归矩阵不等式(28)成立, 则自动跨运车的真实状态 x_{k+1} 包含在其估计椭球

$$(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1$$

中. 此外, 状态估计椭球的中心为式(13).

上述线性矩阵不等式(28)提供了包含真实状态 x_{k+1} 的状态估计椭球集, 然而无法获得一个最优的估计椭球, 因此可以通过解决如下凸优化问题确定最优的状态估计椭球:

$$\begin{aligned} & \min_{P_{k+1} > 0, G_k, L_k, \tau_1 > 0, \tau_2 > 0, \tau_3 > 0} \text{Tr}(P_{k+1}); \\ & \text{s.t. 式(27)}. \end{aligned} \quad (29)$$

综上所述, 所提出改进集员滤波算法可以总结归纳如下.

step 1: 设置初始状态 x_0 和初始状态估计椭球 $\mathcal{X}_0(\hat{x}_0, P_0)$, 给定初始形状矩阵 P_0 , 初始状态估计 \hat{x}_0 , 过程噪声矩阵和测量噪声矩阵 Q_k 、 R_k . 设置最大迭代次数 k_N , 令 $k = 0$.

step 2: 由 $P_k = E_k E_k^T$ 计算 E_k , 利用 S-Procedure 引理, 得到由式(18)和(19)表示的一步提前估计误差(20), 求得使包含真实状态的估计椭球(21)成立的充分条件(24).

step 3: 利用 Schur 补引理, 将式(26)代入(25), 得到递归矩阵不等式(28).

step 4: 通过解决优化问题(29)确定最优估计椭球, 计算形状矩阵 P_{k+1} 、集员滤波器参数 G_k 和 L_k .

step 5: 通过 $P_{k+1} = E_{k+1} E_{k+1}^T$ 计算 E_{k+1} , 由式(12)计算椭球中心 \hat{x}_{k+1} , 输出集员估计椭球集 $\mathcal{X}_{k+1}(\hat{x}_{k+1}, P_{k+1})$.

step 6: 置 $k = k + 1$, 返回 step 2; 若 $k = k_N$, 即达到最大迭代次数, 则停止循环.

4 仿真实验

选择利用 Matlab 进行仿真实验, 将算法应用于自动跨运车的状态估计问题中. 为确保仿真实验的准确性, 假设自动跨运车处于负载一个集装箱的情况下, 其车速保持为 6 m/s 恒定, 自动跨运车部分参数取自文献[4], 具体如表1所示.

表1 自动跨运车参数

参数	数值	单位
m	89 000	kg
h	7.989 1	m
$L_{1,4}$	3.85	m
$L_{2,3}$	1.95	m
K_f	560 000	N/rad
K_φ	15 700 000	N/rad
C_φ	300 000	N·m/s/rad
I_z	1 052 500	kg·m ²
I_{xeq}	2 119 600	kg·m ²
K_r	460 000	N/rad

设置采样点数量 N 为 100, 采样周期 T_s 为 1ms, 初始状态 $x_0 = [3 \quad -8 \quad 2 \quad 10]^T$, 输入 $u_k = \frac{u_{\max}}{k_N} \times k$, 其中 $u_{\max} = [22 \quad 16 \quad 16 \quad 21 \quad 20 \quad 15 \quad 15 \quad 19]^T$, 噪声为未知有界的随机噪声, 且满足过程噪声 $|w_k| \leq 0.3$, 测量噪声 $|v_k| \leq 0.5$, 并取

$$Q_k = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, R_k = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}.$$

设定初始状态椭球中心 $\hat{x}_0 = [-3 \ -8 \ 2 \ 10]^T$, 初始形状矩阵

$$P_0 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

为了验证所提出算法的可行性和有效性,将文献[17]算法以及传统卡尔曼滤波方法作为对比实验,在相同环境下进行仿真验证,得到仿真结果如图3~图6所示.图3~图6分别为自动跨运车质心侧偏角、横摆角速度、侧倾角、侧倾角速度的真实值、估计边界和卡尔曼估计值随时间变化曲线.其中,估计上(下)界1和估计上(下)界2分别表示所设计的改进集员滤波器所得估计边界与文献[17]设计的集员滤波器所得估计边界.从图中可以明显看出,所提出集员滤波方法获得的状态估计上下界总能包含系统的状态真值,因此利用所提出滤波算法对自动跨运车进行状态估计是可行有效的.进一步,通过与文献[17]算法对比可以看出,所提出集员滤波算法的估计上界和估计下界都在文献[17]算法所获得的估计上界和估计下界之内,表明所提出改进集员滤波算法保守性更小,优于传统集员滤波算法.

由于图3~图6仅描述了两种集员滤波方法所获取的状态估计域上下界及卡尔曼方法所获取的状态估计点,为了进一步比较所提出方法相较于卡尔曼方法的优越性,选取集员估计域中心点与卡尔曼滤波结果进行估计误差的比较.估计误差分别定义为卡尔曼状态估计值与真实值之间的偏差及集员状态估计域中心点与真实值之间的偏差,绘制各个状态估计值与真值之间的估计误差曲线如图7~图10所示.集员滤波误差1和误差2分别表示所提出集员滤波算法与文献[17]算法的状态估计误差.可以看出,与所提出集员滤波方法相比,文献[17]算法与卡尔曼滤波方法下的估计误差数值波动较大,且卡尔曼滤波状态偏离的趋势较大,因此对比实验进一步验证了所提出滤波方法的有效性.

从仿真耗时来看,所提出集员滤波算法与卡尔曼滤波相比,消耗的时间略长,与文献[17]算法相比耗时几乎一致.其原因主要在于,所提出集员滤波算法迭代步骤较为复杂,迭代次数较多情况下耗时增加.总体来看,这3种算法仿真耗时差距较小,均能满足自动跨运车实时性的要求.

由文献[6-7]可知,自动跨运车在正常运行过程中,其运动状态具有一定的限制范围,若超出范围则

可能造成严重后果.例如,转向角最大角度约为 50° ,侧倾角最大范围与转向角有关,约为 20° .从仿真结果来看,所提出的集员滤波算法获得的状态估计域与

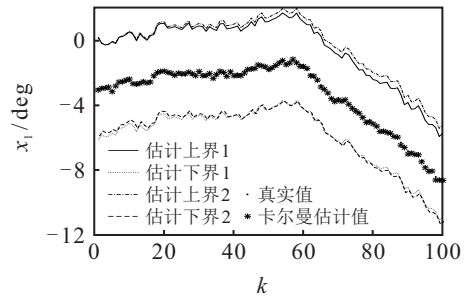


图3 自动跨运车的质心侧偏角变化曲线

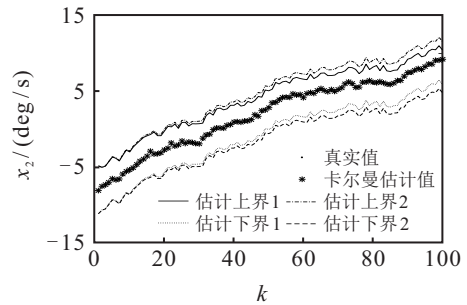


图4 自动跨运车的横摆角速度变化曲线

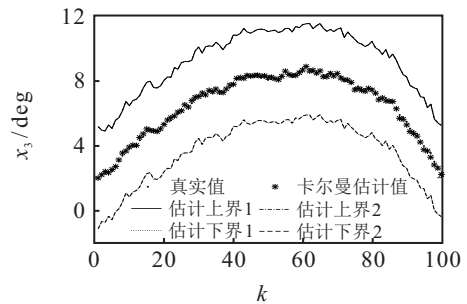


图5 自动跨运车的侧倾角变化曲线

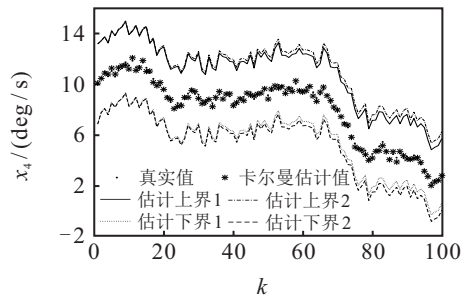


图6 自动跨运车的侧倾角速度变化曲线

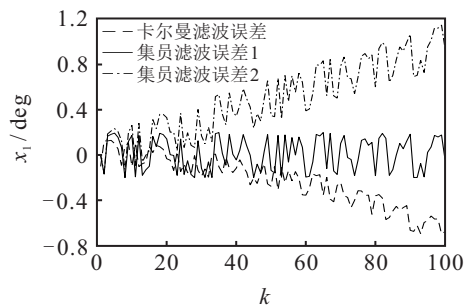


图7 自动跨运车质心侧偏角估计误差对比

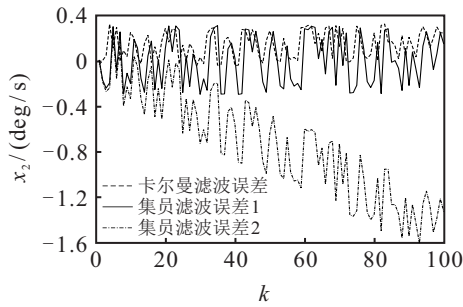


图8 自动跨运车横摆角速度估计误差对比

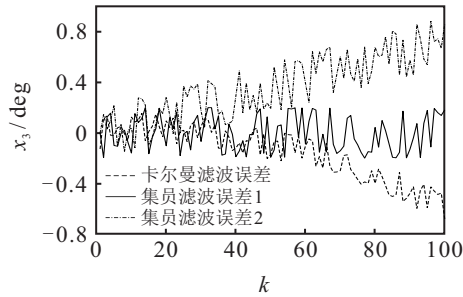


图9 自动跨运车侧倾角估计误差对比

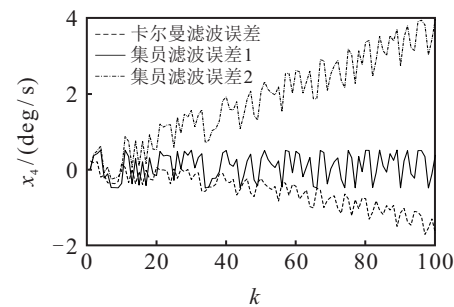


图10 自动跨运车侧倾角速度估计误差对比

系统真实状态值之间的偏差范围足够满足文献[6-7]自动跨运车实际运行需求,因此所提出集员滤波方法可以用于后续控制器设计。

5 结论

本文设计了一种针对港口自动跨运车的改进集员滤波方法. 根据自动跨运车的结构特性,建立了考虑侧倾和转向因素的车辆动力学模型,并将过程噪声和测量噪声建模为未知有界噪声. 在此基础上设计集员滤波方法,推导包含真实状态的估计椭球存在的条件,通过求解线性矩阵不等式得到估计椭球集,利用凸优化方法获得最优的状态估计椭球,并总结为改进的集员滤波算法. 最后,仿真实验验证了所提出改进集员滤波算法的可行性和有效性,并通过与传统集员滤波及卡尔曼滤波的对比,进一步验证了其优越性. 通过本文工作可以实现对自动跨运车在未知有界干扰下的可靠状态估计,后续研究重点将集中在基于所获取的集员状态估计域设计自动跨运车控制器及故障观测器,进一步加强本文工作的研究意义与应用价值。

参考文献(References)

- [1] Kizilay D, Eliyi D T. A comprehensive review of quay crane scheduling, yard operations and integrations thereof in container terminals[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2021, 33(1): 1-42.
- [2] Cai B H, Huang S D, Liu D K, et al. Multiobjective optimization for autonomous straddle carrier scheduling at automated container terminals[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3): 711-725.
- [3] Stavrou D, Timotheou S, Panayiotou C G, et al. Optimizing container loading with autonomous robots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 717-731.
- [4] 李国栋. 无人驾驶跨运车抗倾覆控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 9-30.
(Li G D. Anti-overturn control of unmanned straddle carrier[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 9-30.)
- [5] 王艳国. 无人驾驶跨运车转向系统控制策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 5-7.
(Wang Y G. Research on control strategy of unmanned straddle carrier steering system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 5-7.)
- [6] 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.
(Yu Z P, Gao X J. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.)
- [7] Durrant-Whyte H, Pagac D, Rogers B, et al. An autonomous straddle carrier for movement of shipping containers[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007, 14(3): 14-23.
- [8] Rhode S, Hong S, Hedrick J K, et al. Vehicle tractive force prediction with robust and windup-stable Kalman filters[J]. Control Engineering Practice, 2016, 46: 37-50.
- [9] Śmieszek M, Dobrzańska M. Application of Kalman filter in navigation process of automated guided vehicles[J]. Metrology and Measurement Systems, 2015, 22(3): 443-454.
- [10] Sen S, Chakraborty S, Sutradhar A. Estimation of vehicle yaw rate and lateral motion for dynamic stability control using unscented Kalman filtering(UKF) approach[C]. Michael Faraday IET International Summit. Kolkata, 2016: 24-29.
- [11] Chen T, Cai Y F, Chen L, et al. Design of vehicle running states-fused estimation strategy using Kalman filters and tire force compensation method[J]. IEEE Access, 2019, 7: 87273-87287.
- [12] Chang X H, Liu Y. Robust H_{∞} filtering for vehicle

- sideslip angle with quantization and data dropouts[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10435-10445.
- [13] Boada B L, Boada M J L, Vargas-Melendez L, et al. A robust observer based on H_∞ filtering with parameter uncertainties combined with neural networks for estimation of vehicle roll angle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 611-623.
- [14] Ghaoui L E, Calafiore G. Robust filtering for discrete-time systems with bounded noise and parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(7): 1084-1089.
- [15] 谢蓉, 王新民, 巩建英. 范数有界型参数不确定性系统的概率鲁棒 H_∞ 控制方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1301-1305.
(Xie R, Wang X M, Gong J Y. Probabilistic robust H_∞ control method of norm-bounded parameter uncertainty system[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1301-1305.)
- [16] Schweppe F C. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system inputs[C]. The 6th Symposium on Adaptive Processes. Chicago, 2007: 102-107.
- [17] Yang F W, Li Y M. Set-membership filtering for systems with sensor saturation[J]. Automatica, 2009, 45(8): 1896-1902.
- [18] 彭瑞, 岳继光. 区间分析及其在控制理论中的应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(11): 1201-1207.
(Peng R, Yue J G. A review on interval analysis and its applications to control problems[J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1201-1207.)
- [19] 沈强, 刘洁瑜, 赵乾, 等. 非线性系统中心差分集员估计方法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1239-1249.
(Shen Q, Liu J Y, Zhao Q, et al. Central difference set-membership filter for nonlinear system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(8): 1239-1249.)
- [20] Zhang Y L, Qiu Q W, Yang F W, et al. Set-membership filtering approach for fault detection of systems with unknown-but-bounded noises[C]. The 5th Australian Control Conference. Gold Coast, 2015: 170-175.
- [21] 王子赞, 张梦迪, 王艳, 等. 基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计[J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2973-2981.
(Wang Z Y, Zhang M D, Wang Y, et al. Vector set inversion interval filtering based fault observer design[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2973-2981.)
- [22] 王康, 李琼琼, 王子洋, 等. 考虑侧倾的无人车 NMPC 轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2535-2542.
(Wang K, Li Q Q, Wang Z Y, et al. Trajectory tracking control for automated vehicle based on NMPC considering vehicle rolling motion[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2535-2542.)

作者简介

林爽(1998—), 女, 硕士生, 从事港口自动跨运车位姿估计方法的研究, E-mail: linas2020@163.com;

张依恋(1987—), 女, 讲师, 硕士生导师, 从事智慧港口网络化控制系统滤波与控制算法等研究, E-mail: zhangyl@shmtu.edu.cn;

丁宗贺(1997—), 男, 硕士生, 从事港口自动跨运车跟踪控制方法的研究, E-mail: 1713955352@qq.com;

牛王强(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事港口装卸设备能量管理、控制技术的研究, E-mail: wqniu@shmtu.edu.cn.